

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marin Tomišić

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Marin Tomišić

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru Dr. sc. Ivici Garašiću, dipl. ing. na stručnim savjetima i velikoj pomoći tijekom izrade ovog rada.

Posebno se zahvaljujem asistentu Dr. sc. Matiji Bušiću, dipl. ing. na strpljenju, savjetima i pomoći tijekom izrade ovog rada.

Također se zahvaljujem tehničkom osoblju Laboratorija za zavarene konstrukcije, Laboratoriju za metalografiju, te Laboratoriju za zaštitu materijala koji su mi omogućili izvođenje eksperimentalnog rada.

Na kraju zahvaljujem se mojoj obitelji na pomoći i velikoj podršci tijekom studiranja.

Marin Tomišić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARIN TOMIŠIĆ** Mat. br.: **0035191694**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **TIG zavarivanje super legure nikla Hastelloy C-22**

Naslov rada na engleskom jeziku: **TIG welding of nickel super alloy Hastelloy C-22**

Opis zadatka:

Proučiti TIG zavarivanje nikal legure, načine pripreme samog zavarenog spoja i odabir dodatnog materijala za zavarivanje. Opisati parametre i zaštitne plinove koji se koriste pri zavarivanju legura nikla. Opisati moguće probleme koji se pojavljuju nepravilnim unosom topline i mikrostrukturu rezultirajućeg zavarenog spoja.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je odrediti parametre TIG zavarivanja superlegure Hastelloy C-22. Napisati specifikaciju postupka zavarivanja. Ispitati korozijsko djelovanje cikličkom polarizacijom na licu i naličju zavarenog spoja. Ispitati kemijski sastav u dobivenom zavarenom spoju. Analizirati mikrostrukturu u dobivenom zavarenom spoju. Donijeti zaključke o prikladnosti odabranih parametara i izvršenoj pripremi zavarivanja na temelju provedenih ispitivanja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
27. rujna 2018.

Rok predaje rada:
29. studenog 2018.

Predviđeni datum obrane:
05. prosinca 2018.
06. prosinca 2018.
07. prosinca 2018.

Zadatak zadan:

prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. OPĆENITO O NIKLU	2
3. LEGURE NIKLA	5
3.1. Korozijski postojeće legure nikla (grupa G)	6
3.1.1. Legura Hastelloy C-22	6
3.2. Legure nikla za rad na povišenim temperaturama (grupa I)	8
3.3. Ni, Ni-Cu i Ni-Mo legure (grupa J).....	9
4. KARAKTERISTIKE LEGURA NIKLA	10
4.1. Korozijska postojanost	10
4.2. Postojanost pri visokim temperaturama	12
4.3. Elektrootpornost legura nikla	13
4.4. Magnetski „meki“ materijal	13
4.5. Efekt prisjetljivosti oblika	13
4.6. Kontrolirana istezljivost	14
5. ZAVARLJIVOST LEGURA NIKLA I PRIPREMA SPOJA.....	15
6. POSTUPCI ZAVARIVANJA LEGURA NIKLA	17
6.1. Elektrolučno zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (TIG).....	17
6.1.1. Oprema kod TIG zavarivanja	18
6.1.2. Parametri kod TIG zavarivanja	23
6.1.3. TIG zavarivanje legura nikla.....	27
6.2. Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (MIG)	28
6.3. Ručno elektrolučno zavarivanje (REL).....	29
6.4. Elektrolučno zavarivanje pod praškom (EPP)	30
6.5. Elektrolučno zavarivanje praškom punjenom žicom (FCAW)	30
7. KARAKTERISTIČNE POGREŠKE PRI ZAVARIVANJU Ni LEGURA	31

8. PRIMJENA SUPERLEGURA NA BAZI NIKLA	34
9. EKSPERIMENTALNI DIO	36
9.1. Korištena oprema za izradu eksperimentalnog rada.....	36
9.1.1. Zaštitni plin	38
9.1.2. Osnovni materijal	38
9.1.3. Dodatni materijal.....	39
9.1.4. Specifikacija postupka zavarivanja	41
9.2. Tijek zavarivanja	42
9.3. Priprema uzoraka za ispitivanje	45
9.4. Ispitivanje makroizbrusaka	46
9.5. Analiza mikrostrukture.....	47
9.6. Analiza mikrostrukture na elektronskom mikroskopu	52
9.7. Elektrokemijska korozijska ispitivanja	56
9.7.1. Elektrokemijsko ispitivanje korozijskog djelovanja (DC)	57
9.8. Određivanje kemijskog sastava	62
9.9. Analiza rezultata.....	64
10. ZAKLJUČAK.....	66
LITERATURA	68

POPIS SLIKA

Slika 1. Primjenjivost materijala za dugotrajni rad pri povišenim i visokim temperaturama [1]	1
Slika 2. Pojava zelenkastog sloja patine na kovanici izrađenoj od nikla [5]	3
Slika 3. Grafički prikaz promjene gustoće nekih Ni legura tijekom cikličkih promjena temperature [2]	12
Slika 4. Utjecaj udjela Ni na koeficijent toplinskog širenja Ni-Fe legure s 0,4% Mn i 0,1% C pri 20 °C [2]	14
Slika 5. Shematski prikaz TIG zavarivanja [16]	18
Slika 6. Oprema za ručni TIG postupak [18]	19
Slika 7. Strma karakteristika izvora struje kod TIG zavarivanja [19]	19
Slika 8. Oblici zavara u ovisnosti o vrsti struje [20]	20
Slika 9. Shematski prikaz zrakom hlađenog pištolja [21]	21
Slika 10. Ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina [23]	25
Slika 11. Princip zaštite korijenskog zavara [24]	26
Slika 12. TIG zavarivanje Hastelloy C-22 legure	28
Slika 13. Pukotine uzrokovane nepravilnom tehnikom zavarivanja [14]	31
Slika 14. Prikaz nastajanja tople pukotine kod niklove legure [14]	31
Slika 15. Prikaz zaostalih plinskih mjehurića u metalu zavara [15]	32
Slika 16. Prikaz zarobljenih uključaka u metalu zavara [15]	33
Slika 17. Prikaz uključina i oksida u liniji staljivanja zavarenog spoja legure C -22	33
Slika 18. Dijelovi mlaznog motora izrađenih iz superlegura [27]	34
Slika 19. Lopatica visokotlačne turbine mlaznog motora [27]	35
Slika 20. Radno mjesto za zavarivanje	37
Slika 21. Uređaj za TIG zavarivanje Fronius MagicWave 2200 Job G/F	37
Slika 22. Fluke S68 uređaj za mjerenje međuprolazne temperature	38
Slika 23. V priprema spoja i pripoji napravljeni TIG postupkom	42
Slika 24. Mjerenje međuprolazne temperature	43
Slika 25. Korijenski prolaz	44
Slika 26. Prvi prolaz popune	44
Slika 27. Drugi prolaz popune	44
Slika 28. Treći prolaz popune	44

Slika 29. Popravak korijenskog prolaza sa suprotne strane	45
Slika 30. Zavarena ploča legure C-22, 350x120x6,35	45
Slika 31. Makroizbrusak „4“	46
Slika 32. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51	47
Slika 33. Mikrostruktura osnovnog materijala	48
Slika 34. Mikrostruktura zone utjecaja topline	48
Slika 35. Mikrostruktura korijenskog prolaza	49
Slika 36. Mikrostruktura prvog prolaza	49
Slika 37. Mikrostruktura drugog prolaza	50
Slika 38. Mikrostruktura trećeg prolaza	50
Slika 39. Mikrostruktura popravka korijenskog prolaza	51
Slika 40. Princip rada SEM mikroskopa [16]	52
Slika 41. Tescan Vega TS5136 – Pretražni elektronski mikroskop (SEM)	53
Slika 42. Uzorak na rotirajućem nosaču u komori SEM-a	53
Slika 43. Osnovni materijal uzorka uz povećanje 500 x	54
Slika 44. Linija staljivanja uzorka uz povećanje 1700 x	54
Slika 45. Lice zavora uzorka uz povećanje 1000 x	55
Slika 46. Zavar dolje uzorka uz povećanje 1000 x	55
Slika 47. Tipični raspored elektroda pri elektrokemijskim ispitivanjima [31]	56
Slika 48. Pripremljeni uzorci za ispitivanje	57
Slika 49. Potentiostat/Galvanostat Model 273A EG&E sa odgovarajućom opremom	58
Slika 50. Kretanje korozijskog potencijala tokom ispitivanja za uzorke metala zavora i osnovnog materijala	59
Slika 51. Preklop polarizacijskog otpora za metal zavora i osnovni materijal	60
Slika 52. Preklop krivulja osnovnog materijala i metala zavora kod Tafelove metode	61
Slika 53. Preklop krivulja osnovnog materijala i metala zavora kod cikličke polarizacije	62
Slika 54. XRF analizator	63
Slika 55. Kemijski sastav osnovnog materijala	63
Slika 56. Kemijski sastav dobivenog zavarenog spoja	64

POPIS TABLICA

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva nikla [4]	2
Tablica 2. Legure nikla i njihove glavne grupe [7]	5
Tablica 3. Kemijski sastav legure Hastelloy C-22 [8]	7
Tablica 4. Mehanička svojstva legure C-22 [8]	7
Tablica 5. Kritične temperature rupičaste korozije [8]	7
Tablica 6. Prikaz otpornosti Ni legura na morsku okolinu [8]	8
Tablica 7. Otpornost C-22 na anorganske kiseline [8]	8
Tablica 8. Mehanička svojstva legura nikla pri povišenim temperaturama [4]	10
Tablica 9. Pojavni korozijski oblici na niklu i njegovim legurama [10]	11
Tablica 10. Priprema spoja kod Ni legura [17]	16
Tablica 11. Klasifikacija volframovih elektroda [23]	22
Tablica 12. Usporedba karakteristika zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova [23]	26
Tablica 13. Tehničke karakteristike izvora struje za zavarivanje [28]	37
Tablica 14. Kemijski sastav super legure Hastelloy C-22 [8]	39
Tablica 15. Mehanička svojstva super legure Hastelloy C-22 [8]	39
Tablica 16. Mehanička svojstva dodatnog materijala Ni 6022 [29]	39
Tablica 17. Kemijski sastav dodatnog materijala [29]	40
Tablica 18. Parametri zavarivanja tokom eksperimenta	43
Tablica 19. Dimenzije zavarenog spoja	46
Tablica 20. Vrijednosti korozijskog potencijala	58
Tablica 21. Vrijednosti polarizacijskog otpora R_p	59
Tablica 22. Dobivene vrijednosti Tafelovom metodom tokom ispitivanja	60

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
W	J	toplina
I	A	jakost električne struje
t	s	vrijeme
Q	kJ/mm	unos topline tijekom zavarivanja
U	V	napon
v_z	mm/s	brzina zavarivanja
R_m	N/mm ²	vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	N/mm ²	granica razvlačenja
HRB	Rockwell	tvrdća
E_{kor}	mV	korozijski potencijal
R_p	kΩ/cm ²	polarizacijski otpor
j_{kor}	nA	korozijska struja
v_{kor}	mm/god	brzina korozijske

SAŽETAK

U ovom su radu analizirane super legure na bazi nikla s posebnim naglaskom na leguru Hastelloy C-22. U teorijskom dijelu dan je njihov pregled, te su grupirane po njihovom kemijskom sastavu i svojstvima. Objašnjeni su postupci zavarivanja legura nikla s posebnim naglaskom na TIG zavarivanje. Opisani su načini pripreme spoja, odabir dodatnog materijala, parametri te zaštitni plinovi za zavarivanje legura nikla. Također opisane su pogreške koje se javljaju prilikom zavarivanja te mikrostruktura zavarenog spoja.

U eksperimentalnom dijelu rada opisan je plan zavarivanja super legure Hastelloy C-22 TIG postupkom zavarivanja. Opisana je oprema korištena u eksperimentu, svojstva osnovnog i dodatnog materijala, korišteni zaštitni plin te je izrađena specifikacija zavarivanja (WPS). Analizirana je mikrostruktura osnovnog materijala i metala zavara. Provedeno je elektrokemijsko ispitivanje istosmjernom strujom (DC) osnovnog materijala i metala zavara, te je ispitan njihov kemijski sastav. Rezultati ispitivanja su analizirani, te su izvedeni zaključci o prikladnosti odabranih parametara i izvršenoj pripremi zavarivanja.

Ključne riječi: Hastelloy C-22, TIG zavarivanje, korozijska postojanost

SUMMARY

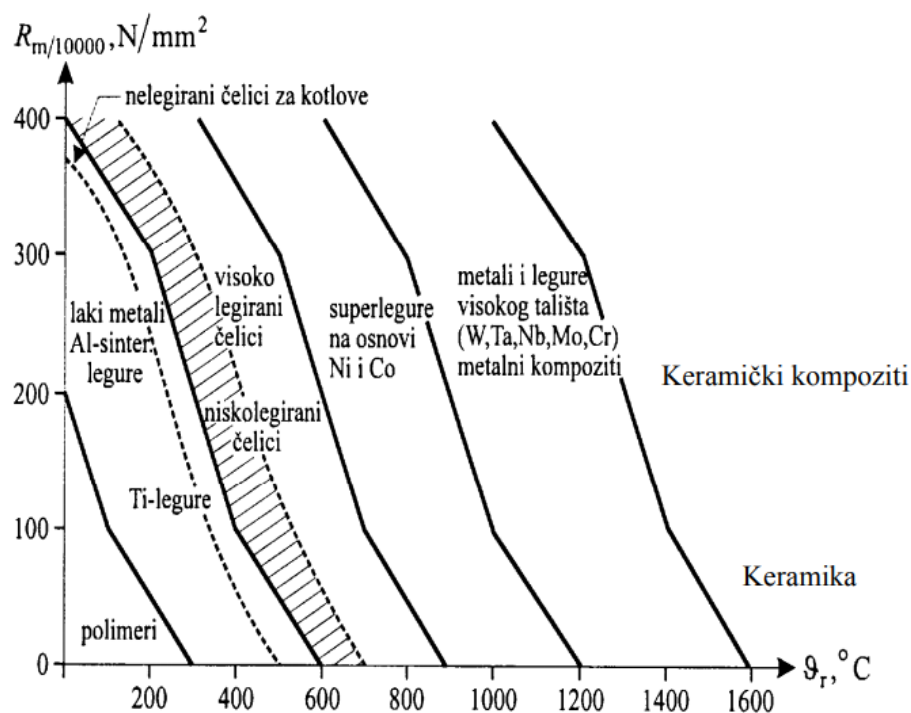
In this thesis, nickel base superalloys have been analyzed with a special emphasis on the Hastelloy C-22 alloy. In the theoretical part their review is given, and they are grouped by their chemical composition and properties. Welding of nickel alloys with special emphasis on TIG welding is explained. Methods of preparation of the welded joint, selection of additional material, parameters and protective gases for welding nickel alloys are described. Also describe of the errors that occur when welding and microstructure of the welded joint is given. The Hastelloy C-22 TIG welding process is described in the experimental part of the welding of the superalloy. Description of the equipment used in the experiment, the properties of the basic and additional material, the used protective gas and the welding specification (WPS) is given. The microstructure of the basic material and the welded joint was analyzed. Electrochemical testing of DC (DC) of basic material and welded joint was performed and their chemical composition was tested. The test results were analyzed and conclusions were made on the suitability of the selected parameters and weld preparation.

Key words: Hastelloy C-22, TIG welding, corrosion resistance

1. UVOD

Povišene i visoke radne temperature vladaju u kemijskoj, procesnoj industriji, u energanama (rad kotlova, turbina, izmjenjivača topline itd.) i dijelovima motora. Poznato je da bi se brzina nekih kemijskih reakcija mogla udvostručiti kada bi se temperatura smjela povisiti samo za desetak kelvina. Na žalost, ograničavajući faktor je ovdje najčešće materijal, i to ili zbog ograničene čvrstoće ili zbog visoke cijene tih vrsta materijala.

Iz tih se razloga danas pridaje velika važnost daljnjem unapređivanju materijala za rad pri visokim temperaturama. Kako se težilo razvijanju materijala koji bi imali visoka mehanička svojstva pri visokim temperaturama, a istovremeno bili korozijski postojani, razvila se grupa materijala pod nazivom super legure. Iz grafa na slici 1 se vidi da super legure na bazi nikla imaju izvrsnu postojanost na visokim temperatura, te time imaju osnovu da se ugrađuju u najsloženije dijelove postrojenja i najopterećenije dijelove mlaznih motora [1].



Slika 1. Primjenjivost materijala za dugotrajni rad pri povišenim i visokim temperaturama [1]

2. OPĆENITO O NIKLU

Nikal je jedan od rijetkih elemenata koji je bio korišten u materijalima od samog početka razvoja civilizacije. Kemijske analize otkrivaju postojanje nikla u alatu, oružju i kovanicama. Materijal pod imenom Pai-Thong (bijeli bakar) je prva legura s velikim udjelom nikla koja se našla u uporabi na Europskom području. Radi se o kineskom materijalu, Ni-Cu-Zn sustava, od kojeg su se izrađivali uglavnom svijećnjaci. Nakon otkrića "supertvrđog" metala u njemačkim rudnicima i pet godina istraživanja, 1746. godine, znanstvenik A.F. Cronstedt utvrđuje da se radi o novom elementu, imenuje ga niklom i svrstava na 28. mjesto u periodnom sustavu elemenata. Pet godina poslije, proizvodnjom Cu-Sn-Pb-Zn legure s 25% Ni (German silver) započinje razvoj legura na bazi nikla [2]. Legure nikla su potpuno austenitne legure s najmanje 30 % Ni i najviše se koriste zbog njihove postojanosti na visokim temperaturama i otpornosti na koroziju.

Nikal je po svojim mehaničkim i magnetskim svojstvima sličan željezu jer je u periodičnom sustavu elemenata blizak Fe. Dobra svojstva su mu antikorozivnost, vatrootpornost (otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama), čvrstoća na visokoj temperaturi i dobar otpor na puzanje. Upravo zbog ovih svojstava se nikal i njegove legure koriste u kemijskoj i naftnoj industriji, parnim i plinskim turbinama, industrijskim pećima za električne otpornike, u elektronici i drugim granama tehnike. Nikal ima plošno centriranu kubnu rešetku odnosno austenitnu strukturu, pa su mu svojstva slična austenitnim čelicima. Struktura nikla i njegovih legura je austenitna od sobnih temperatura do tališta pa nije moguće toplinskom obradom smanjiti zrno. Zrno se može usitniti hladnom deformacijom i naknadnom toplinskom obradom. Radi austenitne strukture nikal posjeduje dobru istezljivost i zavarljivost [3]. U tablici 1 prikazana su fizikalna i mehanička svojstva nikla.

Tablica 1. Fizikalna i mehanička svojstva nikla [4]

Gustoća	Kg/m ³	8900
Talište	°C	1453
Modul elastičnosti	N/mm ²	210000
Toplinska rastezljivost	10 ⁻⁶ /K	13
Vlačna čvrstoća	N/mm ²	380...500
Istezljivost	%	2...60

2.1. Korozijska postojanost nikla

U vrućim oksidativnim plinovima nikal je dosta postojan sve do 1000 °C mada se njegova mehanička svojstva naglo pogoršavaju iznad 800 °C. Povećanjem sadržaja vodene pare i SO₂ snižava se postojanost u takvim plinovima, ali i tada nastaje tamni površinski sloj NiO koji koči daljnju oksidaciju. U H₂S nikal brzo korodira već iznad 100°C jer nastali crni sloj NiS nema dobra zaštitna svojstva. Ako oksidativni plinovi sadrže H₂S, korozija je na temperaturama >300°C vrlo brza zato što nastaju lako taljive eutektičke smjese oksida i sulfida nikla. U takvim okolnostima katkad dolazi i do intergranularnog razaranja. Ista se pojava također zapaža pri izmjeničnom izlaganju vrućim oksidativnim i reduktivnim plinovima. Primarni produkt korozije nikla u elektrolitima redovito je Ni²⁺. Premda je nikal skloniji pravoj pasivnosti od željeza, on ipak korodira u mnogim oksidativnim elektrolitima. Atmosferska korozija nikla redovito je vrlo spora, a očituje se gubitkom sjaja i polaganim tamnjenjem metala. Tek nakon vrlo dugog razdoblja, i to obično u vlažnoj industrijskoj atmosferi, pojavljuje se zelenkasti sloj patine koji se pretežno sastoji od niklanog bazičnog sulfata (smjese hidroksida i sulfata) (slika 2).



Slika 2. Pojava zelenkastog sloja patine na kovanici izrađenoj od nikla [5]

U otopinama neoksidativnih soli, nikal je uglavnom postojan, ali u određenim slučajevima (npr. morskoj vodi), dolazi do pojave rupičaste korozije. Nikal je postojan u slabo aeriranim razrijeđenim neoksidativnim kiselinama kao što su H₂SO₄, HCl, HF, H₃PO₄ i organske kiseline. Brzina korozije osim aeracijom i povećanjem koncentracije raste i zagrijavanjem. U vreloj kloridnoj kiselini, nikal je postojan samo ako je koncentracija HCl manja od 0.5%. U nitratnoj i nitritnoj kiselini, kao i u drugim oksidativnim kiselinama, on je potpuno

nepostojan. Nikal je vrlo otporan na jake lužine do vrelišta, pa čak i na njihove taline. U otopinama amonijaka, koncentracije NH_3 0.05 % C pojavljuju se pukotine uslijed napetostne korozije. Ta se pojava može izbjeći ako se zagrijavanjem na 875 °C kroz 5 minuta popuste napetosti. Rafinacijom se sadržaj ugljika snižava na ~0.02 %, čime se potpuno sprječava spomenuti razorni proces. Kontakt s niklom u elektrolitima ubrzava koroziju aluminija, a u manjoj mjeri također pospješuje koroziju ugljičnog čelika i sivog lijeva [6].

3. LEGURE NIKLA

Legure nikla predstavljaju važan tehnički materijal zbog odličnih mehaničkih svojstava i korozijske postojanosti. Njihova FCC kristalna struktura omogućuje da prilikom sniženja temperature ne dolazi do naglog prijelaza iz područja žilavog u područje krhkog loma. Nagli razvoj i svestrana primjena legura nikla rezultat je njihove otpornosti na koroziju, postojanosti pri visokim temperaturama, dobrih magnetskih i električnih svojstava, mogućnosti kontrolirane istežljivosti i efekta prisjetljivosti oblika [4].

Sve legure nikla su podijeljene u 3 glavne grupe ovisno o sastavu, namjeni i daljnjoj obradi [7]. U tablici 2 su imenovane legure nikla i njihove pripadne glavne grupe.

Tablica 2. Legure nikla i njihove glavne grupe [7]

	Grupa	Legura	Norma (ISO/TR 15608)
Korozijski postojane legure nikla	G-0	625	43
	G-1	C	43
	G-2	C-276	43
	G-3	C-22	43
	G-4	C-2000	43
	G-5	28	45
	G-6	G-30	42
	G-7	690	46
Legure nikla za rad pri povišenim temperaturama	I-0	800	48
	I-1	600	47
	I-2	45TM	46
	I-3	333	43
	I-4	617	46
	I-5	X	43
Ni, Ni-Cu i Ni-Mo legure	J-0	200	41
	J-1	400	42
	J-2	Ni-Cu	42
	J-3	B	44

Prema normi ISO/TR 15608 legure nikla su klasificirane i svrstane u grupe za zavarivanje, oblikovanje, toplinsku obradu i nerazorna ispitivanja. Grupe prema normi navedene su u zadnjem stupcu tablice 2.

3.1. Korozijski postojeće legure nikla (grupa G)

- Legura 625 (22Cr–62Ni–9Mo–3,5Nb),
- Legura C (17Cr–55Ni–16Mo–W),
- Legura C-276 (0,01C–0,05Si–16Cr–57Ni–16Mo–4W),
- Legura C-22 (0,02C–0,2Si–22Cr–56Ni–13Mo–4W),
- Legura C-2000 (22Cr–56Ni–16Mo–(Cu)–(W)),
- Legura 28 (28Cr–30Ni–3,5Mo–1,2Cu),
- Legura G-30 (30Cr–44Ni–5,5Mo–Cu),
- Legura 690 (0,03C–29Cr–61Ni).

Sve legure ove grupe su na bazi nikla te im je osnovna zadaća dobra kemijska postojanost koja ostaje zadržana i pri povišenim temperaturama. Radi se o korozijski najotpornijim legurama na trenutnom tržištu, otpornim na organske i anorganske kiseline, jake alkalije, mineralne kiseline i soli u oksidirajućim i reducirajućim uvjetima. Zahvaljujući velikom udjelu kroma, nikla i molibdena u kombinaciji s niobijem i volframom, dobiveni su materijali za određene namjene, a ne samo za generalnu upotrebu korozijski postojanih materijala. Tako su legure s povišenim udjelom molibdena i volframa otpornije na rupičastu (engl. pitting), napetosnu, opću koroziju i koroziju u procjepu u morskoj vodi, klorovodičnoj i sumpornoj kiselini. S druge strane, posjeduju izvrsna mehanička svojstva kao što je visoka čvrstoća, tvrdoća (otpornost na abraziju), otpornost na puzanje, itd [7].

3.1.1. Legura Hastelloy C-22

Hastelloy C-22 legura (UNS N06022) jedna je od poznatih i dokazanih legura čije su glavne karakteristike otpornost na koroziju i ne-oksidirajuće kemikalije, otpornost na rupičastu koroziju, puknuća i koroziju u pukotinama. Visoki sadržaj kroma pruža mnogo veću otpornost na oksidaciju medija od ostalih legura u skupini.

Kao i ostale legure nikla, Hastelloy C-22 je vrlo duktilna, pokazuje izvrsnu zavarljivost, i lako se izrađuje u industrijske dijelove. Dostupan je u obliku ploča, limova, traka, šipke, žice i cijevi [8]. Kemijski sastav legure dan je tablicom 3, a mehanička svojstva tablicom 4.

Tablica 3. Kemijski sastav legure Hastelloy C-22 [8]

C	Mn	Fe	V	Ni	Si	S	W	P	Co	Mo	Cr
max	max	min/max	max	max	max	max	min/max	max	max	min/max	min/max
0,015	0.50	2,0-6,0	0,35	56	0,08	0,02	2,5-3,5	0,02	2,5	12,5-14,5	14,5-20

Tablica 4. Mehanička svojstva legure C-22 [8]

	Vlačna čvrstoća [MPa]	Istezljivost [%]	Tvrdoća [HRB]
Toplo valjana ploča, 12 mm	744	73	84
Hladno valjani lim, 8 mm	752	69	84
Hladno valjani lim, 3 mm	782	57	86

Hastelloy C-22 legura pokazuje visoku otpornost na rupičastu koroziju uzrokovanog kloridom i korozije u pukotinama. Kako bi se procijenila otpornost legura na navedenu problematiku uobičajeno je mjeriti njihove kritične temperature rupičaste korozije u 6 % otopini željeznog klorida (FeCl_3). Navedene vrijednosti u tablici 5 predstavljaju najniže temperature pri kojima se javlja rupičasta korozija u vremenu od 72 sata [8].

Tablica 5. Kritične temperature rupičaste korozije [8]

Legura	Kritična temperatura rupičaste korozije u 6 % otopini FeCl_3	
	°F	°C
316L	59	15
254SMO	140	60
625	212	100
C-276	>302	>150
C-22®	>302	>150

Morska voda se često koristi kao rashladno sredstvo u mnogim postrojenjima, stoga je potrebno Ni legure testirati i u morskoj okolini. Ispitivanje se provodi na dva uzorka pri temperaturi +29 °C i -3 °C u mirnoj i gibajućoj vodi, trajanje ispitivanja je 180 dana. U tablici 6 prikazana je izvrsna otpornost legure C-22 na koroziju u morskoj okolini u odnosu na ostale legure.

Tablica 6. Prikaz otpornosti Ni legura na morsku okolinu [8]

Legura	Mirujuća voda		Gibajuća voda	
	Broj mjesta napada	Maksimalna dubina napada, mm	Broj mjesta napada	Maksimalna dubina napada, mm
316L	A:2, B:2	A:1.33, B:2.27	A:2, B:2	A:0.48, B:0.15
254SMO	A:2, B:2	A:0.76, B:1.73	A:2, B:2	A:0.01, B:<0.01
625	A:1, B:2	A:0.18, B:0.04	A:2, B:2	A:<0.01, B:<0.01
C-276	A:1, B:1	A:0.10, B:0.13	A:0, B:0	A:0, B:0
C-22®	A:0, B:0	A:0, B:0	A:0, B:0	A:0, B:0

Haynes International napravio je istraživanje otpornosti zavarenih spojeva Ni legura na koroziju. Kod neujednačenog zavarivanja kod ostalih legura dolazi do brže pojave korozije, što nije slučaj za leguru C-22 koja i u ovom testiranju pokazuje izvrsnu otpornost na anorganske kiseline u zavarenom obliku (tablica 7) [8].

Tablica 7. Otpornost C-22 na anorganske kiseline [8]

Kiselina	Koncentracija	Temperatura		Brzina korozije			
	wt. %	°F	°C	Materijal zavora		Osnovni materijal	
				mpy	mm/y	mpy	mm/y
H ₂ SO ₄	30	150	66	0.6	0.02	0.4	0.01
H ₂ SO ₄	50	150	66	9.3	0.24	0.8	0.02
H ₂ SO ₄	70	150	66	10.3	0.26	11	0.28
H ₂ SO ₄	90	150	66	18.5	0.47	13.4	0.34
HCl	5	100	38	<0.1	<0.01	<0.1	<0.01
HCl	10	100	38	<0.1	<0.01	0.4	0.01
HCl	15	100	38	11.1	0.28	9.4	0.24
HCl	20	100	38	10.2	0.26	7.9	0.2

3.2. Legure nikla za rad pri povišenim temperaturama (grupa I)

- Legura 800 (0,04–0,1C–21Cr–32Ni–Ti–Al),
- Legura 600 (0,06C–16Cr–75Ni),
- Legura 45TM (28Cr–45Ni–3Si),
- Legura 333 (25Cr–46Ni–3Mo–3Co–3W–Si),
- Legura 617 (0,07C–22Cr–54Ni–9Mo–12Co–Al–Ti),
- Legura X (22Cr–47Ni–9Mo–2Co–Al–Ti).

Otpornost na koroziju, osobito pri povišenim temperaturama je glavni razlog razvoja ove grupe legura. Ove legure su pogodne za rad na visokim temperaturama, otporne su na oksidaciju i pojavu puzanja materijala pri temperaturama iznad 1000 °C. Dodatkom više od 1% silicija poboljšana je stabilnost sloja oksida koji štiti od daljnje korozije. Legiranje

volframom, molibdenom, aluminijem i titanom omogućuje vrlo dobra mehanička svojstva dok krom i baza nikla daju otpornost na koroziju i visoke temperature [7].

3.3. Ni, Ni-Cu i Ni-Mo legure (grupa J)

- Legura 200 (čisti nikal),
- Legura 400 (65Ni–30Cu),
- Cu-Ni legura (55–90Cu– 45 –10Ni),
- Legura B (68 Ni–28Mo).

Legura 200 (čisti nikal) sadrži više od 99% Ni uz dodatne elemente Cu, Fe, Mn, Si, S i C, rabi se isključivo radi otpornosti na koroziju. Legure s 65% Ni i 30% Cu (Monel) su primjer najveće korozijske postojanosti u fluorovodičnoj kiselini, u svim koncentracijama do temperature vrenja. Cu-Ni legure sadrže tek 10-45% Ni a ostalo je bakar (55-90%) i drugi legirni elementi u malim udjelima. Udjeli bakra i nikla u leguri mijenjaju se ovisno o traženim svojstvima, tako će Cu-Ni legura 70/30 imati bolju otpornost na kavitacijsku koroziju od legure 90/10 koja je s druge strane otpornija na djelovanje morske vode. Legure tipa B su sastavljene od nikla i molibdena ($\approx 28\%$) [7].

4. KARAKTERISTIKE LEGURA NIKLA

Legure nikla su poznate po njihovoj otpornosti prema koroziji i otpornosti pri visokim temperaturama pa ih se ubraja u tzv. super legure, izvanrednih svojstava ali i visoke cijene. Super legure su višekomponentni sustavi na temelju nikla i kobalta s visokim udjelom kroma i manjim udjelima molibdena, volframa, titana i aluminija [6]. Njihova se mehanička svojstva postižu otapanjem legiranih elemenata u kristalima mješancima matrice i precipitacijom intermetalnih spojeva i/ili karbida raspoređenih u austenitnoj matrici. Na očvrnuće kristalima mješancima najjače djeluje kobalt, ali tek iznad 16%. Na očvrnuće precipitacijskim mehanizmom djeluju: molibden stvaranjem Mo_6C ; krom stvaranjem Cr_{23}C_6 ; aluminij i titan stvaranjem koherentnih γ' – faza (Ni_3Al) i nekoherentnih η - faza (Ni_3Ti); niobij, tantal i vanadij stvaranjem karbida [4]. U tablici 8 dan je prikaz osnovnih mehaničkih svojstava pri povišenim temperaturama.

Tablica 8. Mehanička svojstva legura nikla pri povišenim temperaturama [4]

Oznaka materijala		Mehanička svojstva											Gustoća, kg/m³
Trgovačka (zaštićena)	Br. legure	R_m , N/mm²	$R_{p0,2}$, N/mm² pri °C									A_5 , %	
			20	100	200	300	400	500	600	700	800		
Monel K-500	K-500	≥ 1120	≥ 790	750	725	-	-	-	-	-	-	≥ 25	8720
Incoloy 825	825	550	220	205	180	170	160	155	-	-	-	≥ 30	8180
Hastelloy B2	B-2	755	340	315	285	270	255	-	-	-	-	40	9270
Nimonic 75	75	650	≥ 240	450	445	435	425	400	350	250	-	25	8510
Inconel 617	617	700	300	-	-	-	-	200	190	185	-	35	8550
Inconel 718	718	1240	1035	-	-	-	-	950	900	810	630	12	8340

4.1. Korozijska postojanost

Prema normi (HRN EN ISO 8044) korozija je fizikalno-kemijsko međudjelovanje metala i njegova okoliša koje uzrokuje promjenu upotrebnih svojstava metala te može dovesti do oštećenja funkcije metala, okoliša ili tehničkog sustava koji on čini. Sve se svodi na prirodnu težnju prerađenih materijala da se vrate u prvobitno stanje. Legure na bazi nikla su postojane u većini agresivnih medija, no uzevši u obzir brojne oblike korozije, potrebno je obratiti pozornost na uvjete njenog nastanka i brzinu djelovanja na pojedini metal. Svojstva agresivnog medija i materijala su ti koji definiraju tip korozije, brzinu napredovanja i područje širenja korozije. U nastavku je opisana otpornost legura nikla prema različitim oblicima korozije.

Opća korozija - nikal i njegove legure su vrlo otporne na opću koroziju u različitim okolišnim uvjetima. Kako je nikal relativno plemenit metal, legure sa visokim udjelom nikla, tipično pružaju dobru otpornost prema općoj koroziji.





Galvanska korozija - kako je nikal relativno plemenit metal a također i prilično katodan u usporedbi sa većinom drugih metala, vrlo je malo podložan galvanskoj koroziji. Ukoliko je sparen sa plemenitijim metalom može doći do pojave galvanske korozije.

Rupičasta i korozija u procijepu - nikal je donekle podložan rupičastoj i koroziji u procijepu u morskom i drugim okolišima. Površinske nečistoće mogu uzrokovati rupičastu koroziju, jer mogu djelovati kao jezgre pojave korozije. Korozija u procijepu se može pojaviti posebno u dijelovima gdje se zadržava morska voda.

Interkristalna korozija - nikal ima dobru otpornost prema interkristalnoj koroziji iako pojedine legure nikla sa lošom toplinskom obradom, mogu biti podložne pojavi ove vrste korozije. Općenito, veći udio nikla odgovara većoj otpornosti pojave interkristalne korozije. U okolišu sa sumporom, legure nikla imaju povišenu podložnost interkristalnoj koroziji [10].

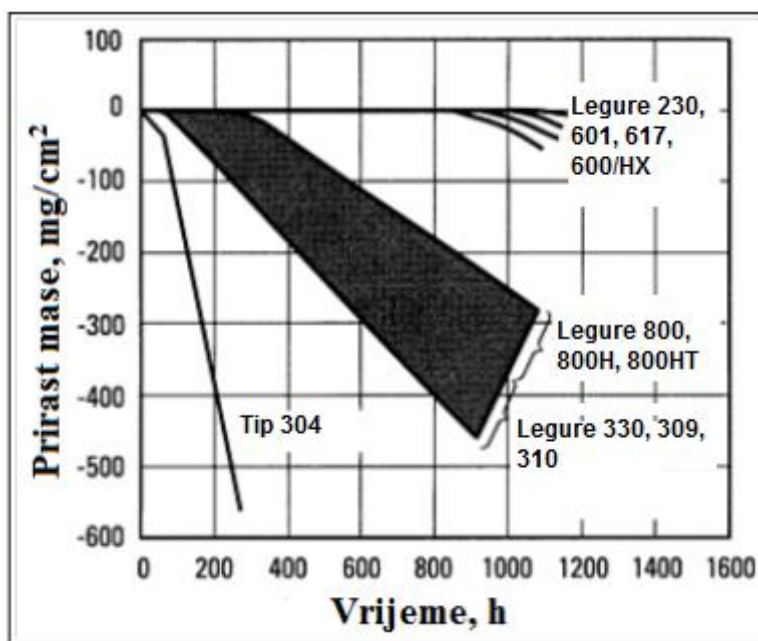
U tablici 9 prikazani su navedeni oblici korozije kod nikla i njegovih legura.

Tablica 9. Pojavni korozijski oblici na niklu i njegovim legurama [10]

Rupičasta korozija	Napetosna korozija
	
Interkristalna korozija	Erozijska korozija
	

4.2. Postojanost pri visokim temperaturama

Legure na bazi nikla su najčešće namijenjene za izradu dijelova za rad u zahtjevnim uvjetima okoliša pri visokim temperaturama. Dodavanje kroma u leguru omogućuje stvaranje zaštitnog sloja oksida na površini konstrukcije dok nikal održava stabilnost sloja pri povišenim temperaturama. Također, Cr-Ni legure s 15% kroma otporne su na oksidaciju i pougljičavanje sve do temperature od 760 °C [2]. Postoje mediji koji djeluju oksidirajuće na krom i istovremeno reducirajuće na nikal pa dolazi do unutarnje oksidacije, no dodatkom željeza u leguri moguće je smanjiti osjetljivost u tim uvjetima. Povećanjem udjela nikla u leguri dolazi do smanjenja apsorpcije ugljika u leguru, malog pada čvrstoće pri povišenim temperaturama, povećanja otpornosti na toplinski šok i toplinski umor materijala [11]. Na slici 3 je vidljiva izvrsna otpornost nekih legura nikla na cikličke promjene temperature. Svaki ciklus se sastoji od 15 minutnog grijanja na 1095°C i 5 minutnog hlađenja na zraku. Ni legure (legura 230, 601, 617 i 600) reagiraju promjenom gustoće tek nakon 800 sati izlaganja temperaturnim ciklusima, dok nehrđajući čelici, također namijenjeni za rad na visokim temperaturama, mijenjaju gustoću već nakon 100 sati izlaganja [2].



Slika 3. Grafički prikaz promjene gustoće nekih Ni legura tijekom cikličkih promjena temperature [2]

Za legure namijenjene za rad pri visokim temperaturama poželjno je da [2]:

- zadržava visoku vlačnu čvrstoću povišenjem temperature,
- zadržava otpornost na puzanje do temperature $0,7 T_t$,

- podnosi izlaganje ciklusima grijanja i hlađenja,
- ima što manji koeficijent toplinskog širenja i što veći koeficijent toplinske vodljivosti,
- bude otporna na koroziju u vrućim plinovima.

4.3. Elektrootpornost legura nikla

Elektrootpornost legura određuju: specifični električni otpor, stabilnost električnog otpora (minimalni utjecaj vremena), nepodložnost električnog otpora temperaturi i nizak električni otpor u odnosu na bakar. Manje utjecajni ali i dalje važni faktori su čvrstoća i duktilnost legure, otpornost na koroziju, koeficijent toplinskog širenja i mogućnost zavarivanja [2]. Ni legure koje se koriste kao dijelovi instrumenata za mjerenje i regulaciju elektriciteta sadrže relativno velike udjele nikla [2]:

- Cu-Ni (45% Ni),
- Ni-Cr-Al (35...95% Ni),
- Ni-Cr-Fe (35...60% Ni),
- Ni-Cr-Si (70...80% Ni).

4.4. Magnetski „meki“ materijal

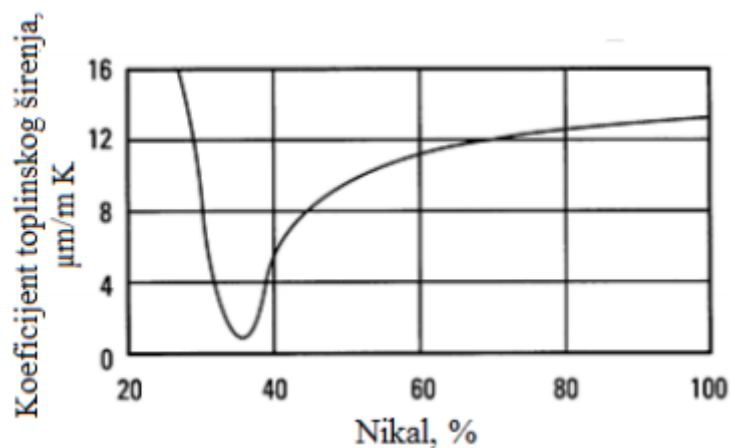
Legure nikla pripadaju skupini mekih magnetskih materijala (eng. magnetically soft materials) čije su osnovne karakteristike: uska petlja histereze, mali iznos koercitivne jakosti magnetskog polja, mali gubici zbog histereze i veliki iznos maksimalne relativne permeabilnosti. U tu grupu spadaju i legura željeza (Fe), kobalta (Co), aluminija (Al) i silicija (Si). Materijali visoke permeabilnosti, djelovanjem magnetskog polja lako poprimaju magnetska svojstva, a njegovim uklanjanjem ih trenutno gube. Legure s 50% Ni rabe se za jezgre impulsnih transformatora i jezgre elemenata koji rade na zvučnim i višim frekvencijama, a od legura sa 79% Ni i 4-5% Mo izrađuju se magnetski oklopi te jezgre malih transformatora, impulsnih transformatora i magnetskih pojačala [2].

4.5. Efekt prisjetljivosti oblika

Prisjetljivost oblika (eng. Shape memory) je sposobnost materijala da uz zagrijavanje na određenu temperaturu poprimi svoj prethodno definirani oblik ili dimenziju. Ni-Ti legure (50% Ni-50% Ti) su jedan od primjera "pametnih" legura s takvim svojstvom [2].

4.6. Kontrolirana istezljivost

Na slici 4 prikazan je dijagram utjecaja udjela nikla u Ni-Fe leguri na koeficijent toplinskog širenja. Vidljivo je da legura s $\approx 36\%$ Ni (Invar) ima najniži koeficijent toplinskog širenja što rezultira gotovo konstantnim dimenzijama pri temperaturama oko $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Povećanjem udjela nikla raste i vrijednost koeficijenta na specifičnu vrijednost što omogućuje "podešavanje" svojstava legure za određenu primjenu.



Slika 4. Utjecaj udjela Ni na koeficijent toplinskog širenja Ni-Fe legure s 0,4% Mn i 0,1% C pri $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [2]

5. ZAVARLJIVOST LEGURA NIKLA I PRIPREMA SPOJA

Zavarivanje Ni i Ni legura moguće je svim postupcima zavarivanja koji se koriste za čelike. Više pažnje treba pri zavarivanju legura, koje se očvršćavaju toplinskom obradom. Otvor žlijeba treba biti nešto više otvoren, jer se rastaljena Ni legura ne širi i ne vlaži rubove kao u slučaju zavarivanja čelika.

Čistoća materijala pri zavarivanju i toplinskoj obradi je veoma važna, pa ove operacije smiju započeti tek nakon temeljitog čišćenja od stranih materijala. Ni legure su osjetljive na prisustvo S, P, Cl, Bi, Pb i nekih drugih niskotaljivih materijala. Budući da su ovi elementi često prisutni u ulju, mastima, bojama, sredstvima za obilježavanje (markeri), uljima za hlađenje pri obradi odvajanjem čestica, radioničkoj prašini, potrebno je potpuno očistiti sve površine, koje će biti zagrijavane za zavarivanja ili druge toplinske operacije.

Potrebno je i trosku poslije zavarivanja brižljivo očistiti, a posebno ako zavar radi na visokim temperaturama, jer se u troski sakuplja sumpor. Također, kod zavarivanja legura koje se očvršćavaju naknadnom toplinskom obradom, stvaraju se od elemenata koji omogućavaju očvršćivanje, oksidi s visokom temperaturom taljenja, pa ove okside treba brižljivo čistiti, da ne dođe do grešaka vezanja i uključaka oksida.

Oksidi se moraju odstraniti s površina, koje se zavaruju, jer imaju višu temperaturu taljenja nego osnovni materijal, pa može doći do greške vezivanja, nepotpune penetracije ili uključaka oksida. Oksidi se odstranjuju brušenjem, pjeskarenjem (sačmarenjem), kemijskim sredstvima ili obradom odvajanjem čestica. Rotirajuće četke neće uvijek moći odstraniti okside, no ako se koriste trebaju biti od nehrđajućeg čelika. Svi alati koji se koriste trebaju biti čisti. Ne smiju se prije koristiti za druge materijale, jer će zaostale čestice drugih metala na alatu uzrokovati onečišćenje zavora. Čestice željeza mogu uzrokovati onečišćenje zavora i koroziju.


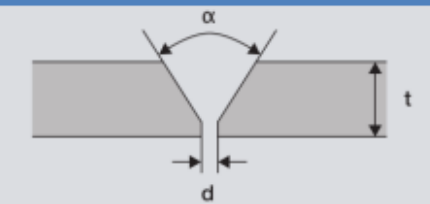
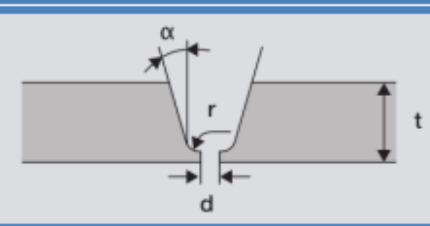
Masnoće i prljavštinu treba s površina rubova, koji se zavaruju, kao i sa žica - dodatnog materijala odstranjivati alkoholom ili acetonom i brisanjem čistim krpama, koje ne ostavljaju niti. Prljava krpa može uzrokovati pukotine na površini.

Unošenje dodatne topline predgrijavanjem, među prolaznom temperaturom i prevelikim toplinskim inputom izvora topline nije potrebno, no nije niti jako štetno. Bolje je raditi s manjim unošenjem topline. Preveliko unošenje topline može uzrokovati likvaciju, izlučivanje i druge metalurgijske pojave, koje mogu rezultirati pukotinama na osnovnom materijalu.

Ako je osnovni materijal hladan, preporučuje se zagrijavanje na 20 °C da bi se izbjegla kondenzacija vlage, koja može uzrokovati poroznost zavora. Ako se radi s velikim unošenjem topline ili visokom temperaturom među prolazima, a uz slabu zaštitu inertnog plina može doći do stvaranja debelog sloja oksida, koji uzrokuje različite greške i grubu površinu zavora.

Zavarivanje treba provoditi bez predgrijavanja (izuzev u početku za odstranjenje kondenzirane vlage) uz što niži toplinski input i ograničiti međuslojnu temperaturu na 100 °C. Ako je potrebno, zavar se može hladiti vodom [12]. U tablici 10. prikazana je karakteristični izgled pripreme spoja kod zavarivanja Ni legura.

Tablica 10. Priprema spoja kod Ni legura [17]

Oblik spoja	Debljina, t (mm)	Razmak, d (mm)	Visina korijena, k (mm)	Kut, α (°)
	3 - 5	1 - 3	-	-
	3 - 8	1 - 3	1 - 2	55 - 65
	> 8	1 - 2	1 - 2	10 - 15

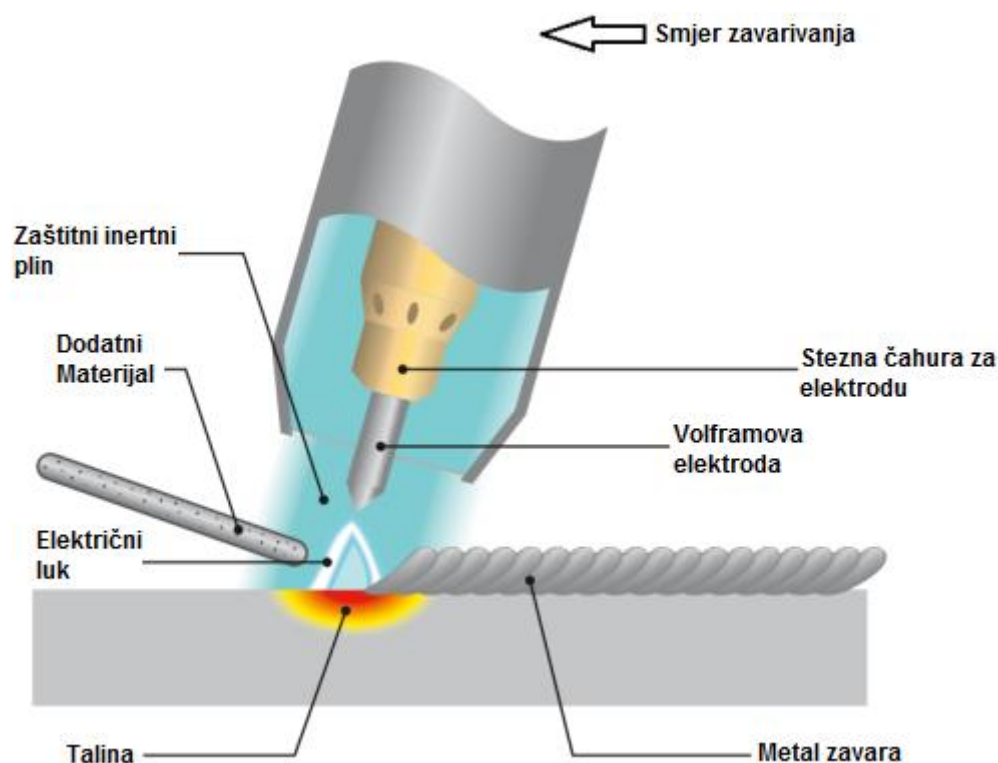
6. POSTUPCI ZAVARIVANJA LEGURA NIKLA

Zavarivački procesi kod kojih se koristi inertni plin, kao što su TIG i MIG, su uobičajeni i primjenjivi kod svih legura nabrojanih u tablici 2. Procesi kod kojih imamo trosku, kao što su REL, EPP i praškom punjena žica su većinom upotrebljivi kod korozijski otpornih materijala i kod onih legura koje ne sadrže reaktivne elemente. Ostali zavarivački procesi, poput plazma zavarivanja, laserskog zavarivanja, zavarivanja elektronskim snopom, zavarivanja trenjem i elektrootpornog zavarivanja su primjenjivi kod većine legura te se koriste u specijalnim slučajevima. Neprihvatljivi su procesi zavarivanja koji izlažu metal previsokom sadržaju nečistoća poput kisika, ugljika ili dušika, kao što je plinsko zavarivanje [13].

6.1. Elektrolučno zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (TIG)

Električni luk se kod TIG postupka zavarivanja uspostavlja na dva načina: pomoću visokofrekventnog generatora (VF generator), koji se uključuje samo u djeliću sekunde, neposredno pred zavarivanje, te kontaktnom uspostavom električnog luka. Nakon uspostavljanja električnog luka između netaljive volframove elektrode i radnog komada, tj. priključaka na polove električne struje (istosmjerne ili izmjenične), VF generator se isključuje, a postupak zavarivanja se odvija sa dodavanjem dodatnog materijala (žice), a ponekad i bez. Nakon toga slijedi taljenje ivice žlijeba za zavarivanje (kod materijala manje debljine – I spoj), odnosno ravnomjerno ručno dodavanje žice za zavarivanje u električni luk, te taljenje žice i stvaranje zavarenog spoja (kod debljih materijala ili kod provarivanja korijena debelih materijala) [14]. Na slici 5 prikazan je shematski prikaz TIG zavarivanja.

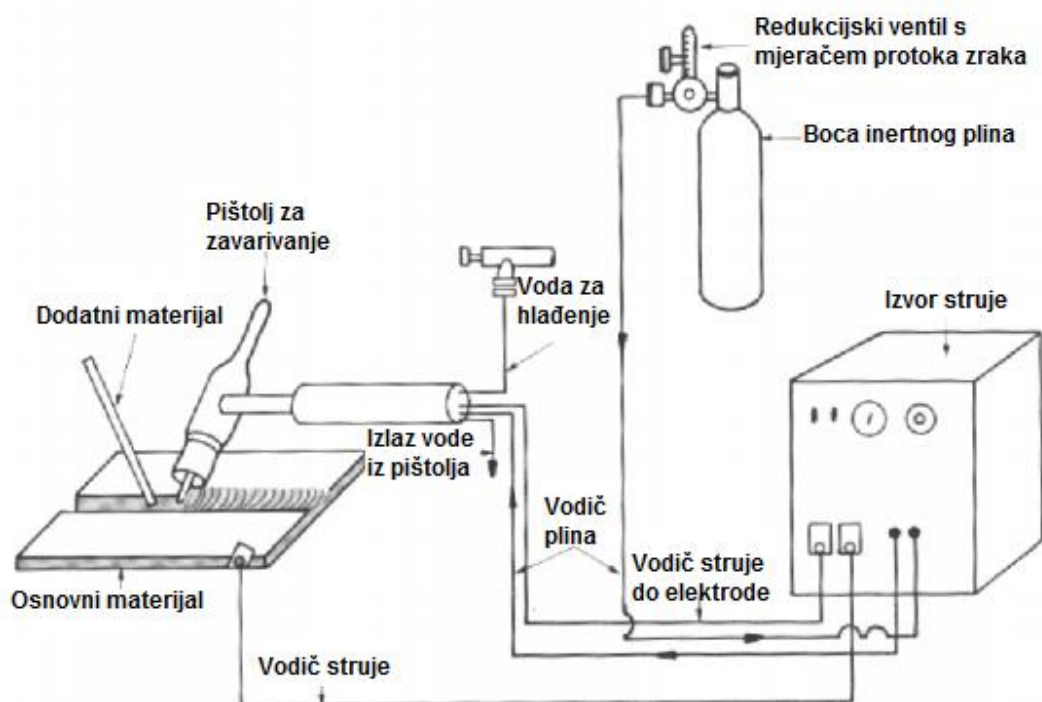
TIG postupak zavarivanja je najčešće ručni postupak zavarivanja iako se u zadnje vrijeme teži prema poluautomatizaciji i potpunoj automatizaciji (robotizaciji) samog procesa. Kod ručnog postupka zavarivač pomiče pištolj i u prednji rub taline u pravilnim vremenskim razmacima dodaje dodatni materijal. Poluautomatizirani postupak je vrlo sličan ručnom postupku osim što se u ovom slučaju dodatni materijal dodaje iz dodavača žice uz pomoć elektromotora [15].



Slika 5. Shematski prikaz TIG zavarivanja [16]

6.1.1. Oprema kod TIG zavarivanja

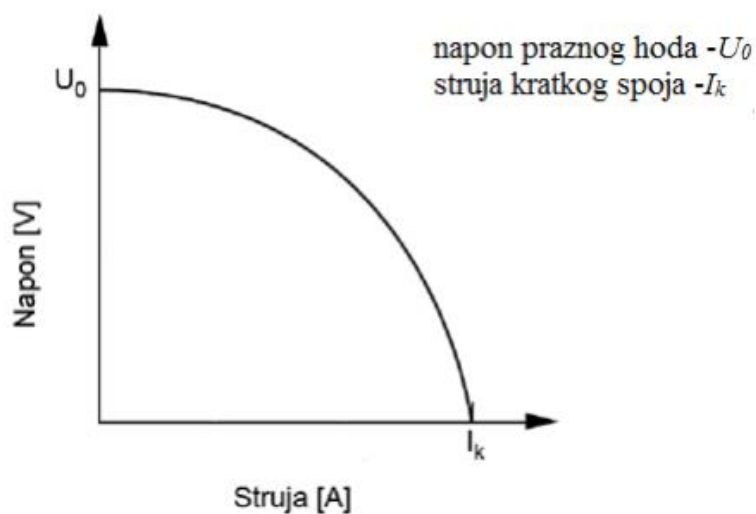
Na slici 6 prikazana je osnovna oprema koja je potrebna za TIG postupak zavarivanja. Kontrolni ormarić u kojem se nalazi transformatorsko napajanje, strujni ispravljač, upravljačka elektronika i sistem za rashlađivanje pištolja su priključeni na električnu mrežu. Izvori struje za TIG zavarivanje mogu biti transformatori, ispravljači i inverteri. Izvori imaju konstantnu strujnu karakteristiku i mogu obavljati impulsno TIG zavarivanje [18]. Ovisno o materijalu koji se zavaruje, mora se pripaziti na koji je pol (- / + / AC) priključena elektroda. Drugi kraj se spaja na radni komad uz pomoć steznih kliješta kako bi se zatvorio strujni krug. Zaštitni inertni plin se nalazi u atestiranoj čeličnoj boci s regulatorom protoka na koji se nadovezuju mjerni instrumenti. Zaštitni plin (Ar, He) izlazi iz sapnice pištolja te tako štiti područje zavara i volframovu elektrodu od kontaminacije okolnim plinovima iz atmosfere. Moderni uređaji imaju integrirani sustav hlađenja pištolja pomoću tekućine za hlađenje. Svi uređaji su spojeni s pištoljem pomoću polikabla i preko njega se provodi kontrola procesa [17].



Slika 6. Oprema za ručni TIG postupak [18]

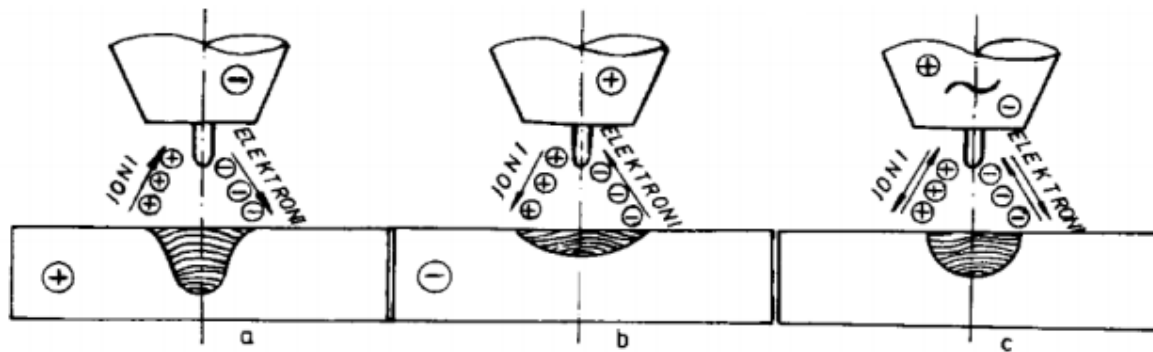
Izvori struje

Izvori struje imaju strmu karakteristiku. To znači da se struja održava tijekom zavarivanja na približno jednakim vrijednostima, bez obzira na to kako se mijenja napon (visina električnog luka koju sam zavarivač određuje). U idealnom slučaju bi se jakost struje održavala na stalnim vrijednostima prilikom zavarivanja, međutim u praksi se malo mijenja. Na slici 7 je prikazana strma karakteristika izvora struje za TIG zavarivanje [19].



Slika 7. Strma karakteristika izvora struje kod TIG zavarivanja [19]

Kod TIG postupka se najčešće koriste izmjenična struja (AC) i istosmjerna struja (DC) (minus pol na elektrodi). Utjecaj vrste struje na oblik zavora izveden TIG postupkom je prikazan na slici 8. Istosmjerna struja direktne polarnosti daje najuži i najdublji provar. Toplina pri zavarivanju se raspoređuje približno 1/3 na elektrodi, a 2/3 na osnovni materijal. Ionizirane čestice su usmjerene od materijala prema elektrodi, a elektroni od elektrode prema osnovnom materijalu, tako da se ne dobiva efekt površinskog čišćenja oksida. Stoga se istosmjernom strujom zavaruju metali kod kojih efekt čišćenja nije potreban (čelici, nikal, bakar i njihove legure). Kada je elektroda spojena na + pol, toplina pri zavarivanju se raspoređuje suprotno prethodnom slučaju, odnosno 2/3 na elektrodu, a 1/3 na osnovni materijal, što je neracionalno, daje nestabilan luk i pregrijava elektrodu i pištolj [20].

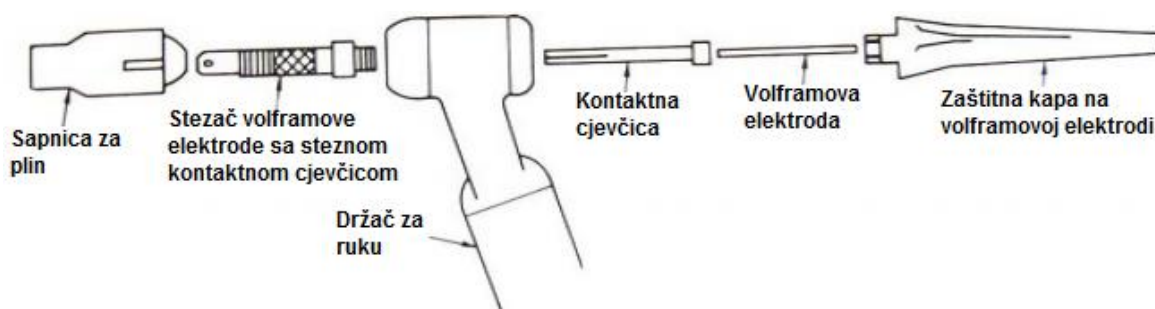


Slika 8. Oblici zavora u ovisnosti o vrsti struje:

a) DC (-), b) DC (+), c) AC [20]

Pištolf za zavarivanje

Pištolf za zavarivanje sadrži volframovu elektrodu koja dovodi električnu struju za uspostavljanje električnog luka. Pištolji za zavarivanje se dijele na zrakom hlađene koji se upotrebljavaju za niže struje zavarivanja (150-200 A) i kraća vremenska opterećenja te na pištolje hlađene rashladnom tekućinom (voda, antifriz) koji se upotrebljavaju za veće jakosti struje zavarivanja [17]. Na slici 9 prikazana je shema uobičajenog zrakom hlađenog pištolja, sa svim sastavnim dijelovima.



Slika 9. Shematski prikaz zrakom hlađenog pištolja [21]

Sapnica

Služi za usmjeravanje plina tokom zavarivanja, može biti konusnog, cilindričnog i profilnog oblika ovisno o jakosti struje tokom zavarivanja. Sapnica može biti izrađena od različitih materijala koji su otporni na visoke temperature. Najčešće je izrađena od vatrootpornog minerala, keramike (za manje i srednje jakosti struje zavarivanja) i iz kromiranog bakra hlađena vodom (za veće jakosti struje zavarivanja). Izbor veličine sapnice se određuje prema promjeru elektrode za zavarivanje, budući da je kod veće jakosti struje zavarivanja potrebna i veća količina zaštitnog plina kao i veći promjer elektrode. Kod elektroda manjeg promjera (do promjera 2,4 mm) odnos promjera elektrode i unutarnjeg promjera sapnice iznosi približno 1:5 – 1:6. Kod elektroda većeg promjera taj odnos je približno 1:4 [22].

Netaljiva volframova elektroda

Volframova netaljiva elektroda je provodnik električne struje s pištolja na radni komad. Ona je netaljiva, ali uslijed erozije vrha, te zbog njegovog prljanja u slučaju nehotičnog kontakta s radnim komadom, što se brušenjem mora ukloniti, ona se ipak postupno troši. Prosječni vijek trajanja netaljive elektrode dužine 200 mm iznosi 30 sati. Volfram (eng. tungsten) je metal velike gustoće s talištem $T_t = 3422\text{ }^{\circ}\text{C}$. Izrađuju se iz čistog volframa ili volframa s dodacima torijevog oksida (ThO_2), cirkonijskog oksida (ZrO_2), lantanovog oksida (La_2O_3) ili cerijevog oksida (CeO_2). Klasifikacija volframovih elektroda po legirnim elementima te indentifikacija pomoću boja prikazano je u tablici 11 [23].

Tablica 11. Klasifikacija volframovih elektroda [23]

Oznaka (ISO)	Dodatak oksida, (%)	Legirni oksid	Legirni element	Boja
W	-	-	-	Zelena
WC 20	1,8 – 2,2	CeO ₂	Cerij	Siva
WL 10	0,9 – 1,2	La ₂ O ₃	Lantan	Crna
WZ 4	0,3 – 0,5	ZrO ₂	Cirkonij	Smeđa
WT 10	0,8 – 1,2	ThO ₂	Torij	Žuta
WT40	3,8 – 4,2	ThO ₂	Torij	Narančasta

Elektrode legirane s torijem mogu provoditi 20 % jaču električnu struju nego čiste volfram elektrode. Lakše je paljenje luka i luk je stabilniji, a koristi se s izvorima istosmjerne struje (DC). Elektrode legirane s cerijevim oksidom (CeO₂) i s lantanovim oksidom (La₂O₃) su se pojavile '80-ih godina u SAD-u jer za razliku od torija nisu radioaktivne (α zračenje). Obje se koriste s izvorima izmjenične i istosmjerne struje. Elektrode legirane s cirkonijevim oksidom (ZrO₂) po svojstvima su između čistih i elektroda legiranih s torijevim oksidom. Vrsta i promjer volframovih elektroda bira se prema debljini i prema vrsti metala koji se zavaruje.

Kod izbora legirane elektrode važno je obratiti pažnju i na njezinu pripremu. Koriste se elektrode sa zaobljenim i šiljastim vrhom, zaobljena se koristi kod zavarivanja Al, Mg i njihovih legura, dok se drugi materijali zavaruju sa elektrodom šiljastog vrha. Pravilnim odabirom elektrode izbjegavaju se nestabilnosti luka [23].

Rashladni sustav

Rashladni sustav se upotrebljava za hlađenje pištolja, a rashladna sredstva koja se koriste su voda (deionizirana i destilirana) i/ili antifriz, te primjese antikorozivnih dodataka, a dovode se crijevima. Dovodno crijevo je uže, a odvodno šire, jer se u njega obično stavlja provodnik električne struje za zavarivanje, tako da voda kod izlaska hladi provodnik. Tri su vrste rashladnih sustava, koji su ugrađeni u sklopu aparature za TIG zavarivanje:

1. Otvoreni – crijevo se priključuje direktno na vodovod,
2. Zatvoreni centralni – sastoji se od velikog spremnika za vodu i crpke koja služi za pogon vode po dijelovima aparature,

3. Zatvoreni pojedinačni – sastoji se od malog spremnika, hladnjaka, elektromotora i crpke.

U sustavima koji imaju ugrađenu crpku, antifriz je bolje rashladno sredstvo, jer ujedno podmazuje crpku. Potrebno je osigurati da postoji dobro brtvljenje sustava, posebno na pištolju za zavarivanje, jer ako se na pištolju stvara kondenzat, vodik iz vode može ući u zavar, te stvara poroznost zavora, što jako loše utječe na mehanička svojstva samog zavora [22].

6.1.2. Parametri kod TIG zavarivanja

Prilikom zavarivanja najbitnije je obratiti pozornost na odabir parametara, jer se njima određuje kvaliteta zavora. Parametri kod TIG zavarivanja su: vrsta i jakost struje zavarivanja, napon, protok zaštitnog plina, brzina zavarivanja i dodatni materijal.

Struja i napon zavarivanja

Kao što je gore navedeno kod TIG zavarivanja može se zavarivati sa istosmjernom strujom (DC) sa elektrodom na minus i plus polu, te izmjeničnom strujom. Sa jačinom električne struje može se kontrolirati dubina penetracije i količina depozita. Ona se određuje na temelju vrste i promjera elektrode, vrste električne struje, položaja zavarivanja, pripreme spoja, debljine osnovnog materijala te ograničenjem jakosti struje uređaja.

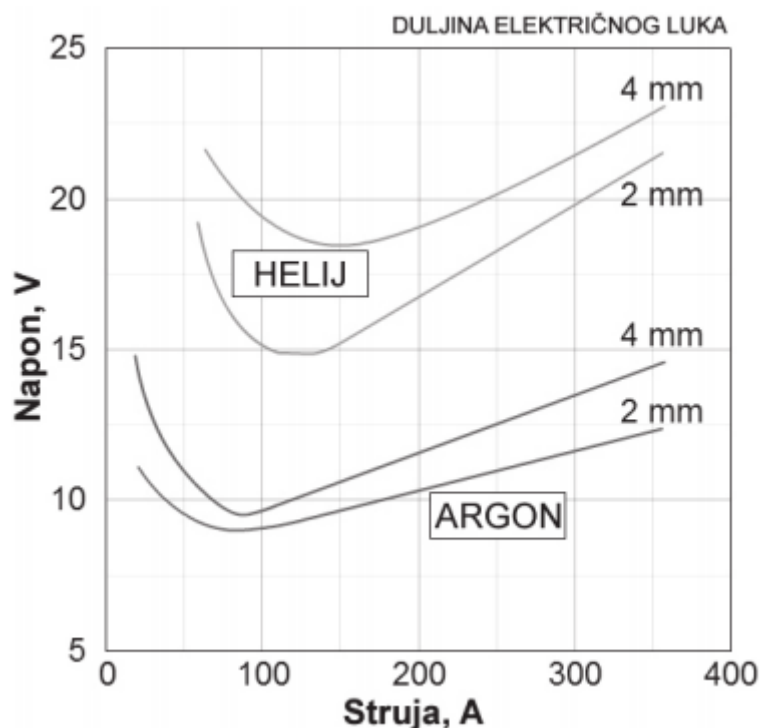
Napon zavarivanja proporcionalan je visini električnog luka (visina električnog luka iznosi približno promjer elektrode, ili manje) prilikom zavarivanja, a kod TIG zavarivanja iznosi od 15 do 35 V. Povezan je s jačinom struje prilikom zavarivanja preko strme statičke karakteristike izvora [22].

Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja je put koji električni luk prođe po radnom komadu u određenom vremenu. Uz napon i jakost struje, brzina zavarivanja određuje unos topline u radni komad. Promjena brzine zavarivanja ima veliki utjecaj na oblik zavora i dubinu penetracije. Prilikom ručnog zavarivanja brzinu zavarivanja određuje i postiže zavarivač, dok se kod mehaniziranog zavarivanja ona postiže pomoću opreme. Ako se drugi parametri ne mijenjaju, povećanje brzine zavarivanja će uzrokovati smanjenje depozita i dubine penetracije. Ako se struja i brzina zavarivanja proporcionalno povećavaju ili smanjuju dubina penetracije i širina zavora se neće mijenjati [17].

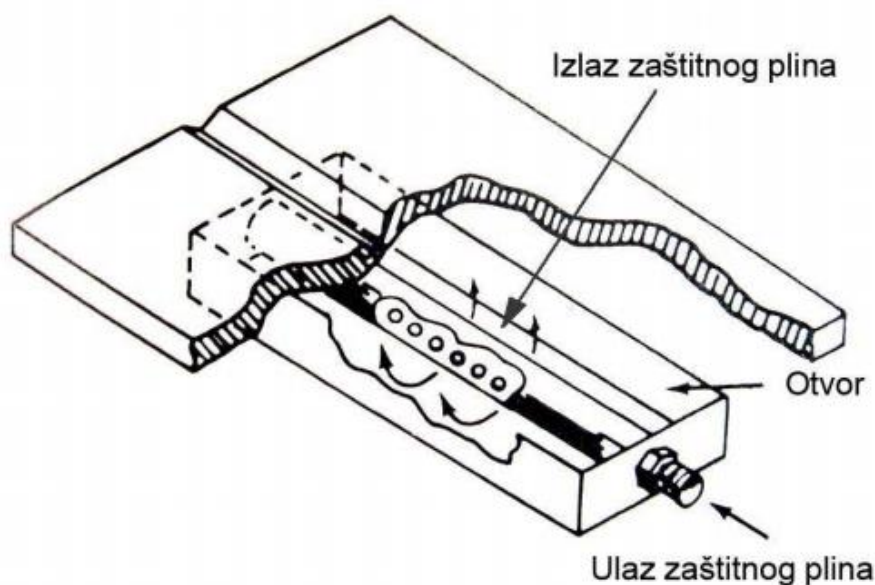
Vrsta i protok zaštitnog plina

Funkcija zaštitnog plina je da štiti talinu zavara od utjecaja okoline (oksidacije). Zaštitni plin direktno utječe i na stabilnost te kvalitetu električnog luka, geometrijske karakteristike zavarenog spoja, estetski izgled zavarenog spoja kao i na količinu para koje se oslobađaju tijekom procesa zavarivanja. Najčešći zaštitni plinovi koji se koriste u primjeni TIG postupka zavarivanja su plemeniti plinovi helij i argon. Iako se u izvornom obliku TIG postupka koristio helij, danas je argon dominantan u primjeni. Oba plina su inertna te daju zaštitnu atmosferu u kojoj ne dolazi do kemijskih reakcija između zaštitnog plina i osnovnog materijala. Argon je najjeftiniji inertni plin koji se koristi kod TIG zavarivanja, ali to nije jedina njegova prednost. Ima niski ionizacijski potencijal (energija potrebna za uzimanje jednog elektrona atoma plina da ga pretvori u ion), 15,7 eV, što olakšava uspostavu i stabilnost električnog luka. Također je 1,4 puta teži od zraka te izlaskom iz sapnice potiskuje zrak i dobro štiti rastaljeni metal, a ista karakteristika doprinosi i potrebi za manjim protokom prilikom zavarivanja. Argon u odnosu na helij ima nižu toplinsku vodljivost što rezultira kompaktnijim električnim lukom čime se dobiva manja penetracija i protaljšivanje. Minimalna potrebna čistoća argona iznosi 99,95 %, iznimno 99,997 %. Helij je plin s višim ionizacijskim potencijalom (24,5 eV) što otežava uspostavu električnog luka. Male je mase (10 puta manje nego argon), zbog čega protoci helija moraju biti i do tri puta veći, nego što je slučaj s argonom. Dobra strana helija kao zaštitnog plina je vrlo dobra toplinska vodljivost te daje širi električni luk. Toplina iz električnog luka brže se prenosi na radni komad, daje veću penetraciju i unos topline (napon električnog luka sa zaštitnim plinom helijem je značajno veći nego kod argona pri istim strujama). Slika 10 prikazuje ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina kod TIG zavarivanja. Ova karakteristika posebno dolazi do izražaja prilikom zavarivanja materijala velike toplinske vodljivosti (npr. bakra) te zavarivanja radnih komada većih debljina. Također, iz slike 10 je vidljivo povećavanje napona električnog luka pri nižim strujama (kod helija je to između 50 i 100 A što je nepovoljno kod zavarivanja tanjih materijala koje se upravo i zavaruju u ovom rasponu struja. Minimalna potrebna čistoća helija kao zaštitnog plina iznosi 99,99 % [23].



Slika 10. Ovisnost duljine električnog luka o vrsti zaštitnog plina [23]

Kod TIG zavarivanja postoji funkcija plinske zaštite korijenskog zavora koja štiti korijen zavora od utjecaja plinova iz okoline. Kada se provodi zavarivanje s jedne strane i samo s te strane se štiti talina zavora, s druge strane zavora je također potrebna zaštita, jer bi se u suprotnom u korijenu zavora mogle skupiti nečistoće iz atmosfere koje loše utječu na mehanička svojstva zavora. Također se dobiva i sjajnija površina, te je smanjena mogućnost oksidacije površine zavora. Nakon što se stvori zaštitna atmosfera protok plina se smanjuje, te se održava tek toliko da postoji mali tlak unutar prostora u kojem se nalazi zaštitni plin. Kada je korijenski zavar dovršen zaštitni plin se ispušta [24]. Na slici 11 prikazan je princip zaštite korijenskog zavora.



Slika 11. Princip zaštite korijenskog zavora [24]

Osim čistog inertnog plina argona i helija, česta je primjena njihovih međusobnih mješavina u različitim omjerima. Tablica 12 prikazuje usporedbu karakteristika zavarivanja kod korištenja različitih zaštitnih plinova. Osim argona i helija, za zavarivanje nikal legura, duplex i austenitnih nehrđajućih čelika koristi se mješavina argona i dušika s udjelom (1-3 %) [23].

Tablica 12. Usporedba karakteristika zavarivanja pri primjeni različitih zaštitnih plinova [23]

Karakteristika	Ar	Mješavina Ar/He	He
Brzina zavarivanja	smanjena	veća nego kod 100% Ar	veća
Penetracija	smanjena	veća nego kod 100% Ar	povećana
Čišćenje oksida	dobro	sličnije kao kod 100% Ar	loše
Uspostava luka	laka	bolja nego kod 100% He	otežana
Stabilnost luka	dobra	bolja nego kod 100% He	niža kod manjih struja
Oblik luka	uži, fokusiran	uži nego kod 100% He	širi
Napon luka	manji	srednja	veći
Protok	manji	veći nego kod 100% Ar	povećan
Cijena	niža	veća nego 100% Ar	veća nego 100% Ar

Dodatni materijal

Izvođenje TIG postupka zavarivanja moguće je sa ili bez dodatnog materijala. Zavarivanje bez dodatnog materijala, pretaljivanje, upotrebljava se najčešće do debljina osnovnog materijala od 3 mm. Ukoliko postoji potreba za dodatnim materijalom on se dodaje ručno ili automatizirano. Kod ručnog dodavanja materijala u zavareni spoj radi se s šipkama različitih promjera i duljine oko 915 mm. Kod automatiziranog dodavanja se dodatni materijal mehanizirano dovodi do rastaljenog osnovnog materijala u "hladnom" ("cold wire") ili predgrijanom stanju ("hot wire"). Osnovna prednost ovakvog načina dovođenja dodatnog materijala kod TIG zavarivanja je znatno povećanje produktivnosti procesa (veća količina depozita) čime se umanjuje najveći nedostatak TIG postupka zavarivanja [17].

Dodatni materijal se izabire po sastavu što bliže osnovnom. Kod legura koje postižu višu čvrstoću toplinskom obradom nećemo moći uvijek postići ista svojstva zavares bez toplinske obrade. Luk treba držati što kraći (1-2 mm). Korijensku stranu zavares treba štititi argonom. Često se Ni i Ni legure koriste za platiranje navarivanjem.

Toplinska obrada se mora provoditi u atmosferi bez sumpora (mazut ili gorivo ulje manje od 0,2%, a plin manji od 0,2 g na m³) [12].

6.1.3. TIG zavarivanje legura nikla

TIG je uobičajen postupak zavarivanja koji se koristi kada je potrebna visoka kvaliteta zavares dok se tolerira niska količina nataljenog dodatnog materijala. TIG se često koristi kod zavarivanja korijenskog sloja kada se zahtijeva potpuna penetracija, te se preporučuje za zavarivanje otvorenog korijenskog prolaza. Postupci koji nude veću količinu nataljenog materijala, MIG i REL, se mogu koristiti za zavarivanje popune i završnog sloja. Preporučuju se elektrode s dvopostotnim udjelom torija ili nekog neradioaktivnog ekvivalenta. Koristi se istosmjerna struja s elektrodom na negativnom polu, tj. DCEN konfiguracija. Dodatni materijali mogu biti u obliku gole žice, te su specifikirani u AWS A5.14 ili u AMS (Aerospace Materials Specification) specifikaciji objavljenoj od strane SAE (Society of Automotive Engineers). Za zaštitni plin najčešće se koristi čisti argon. Helij ili mješavine argon-helij se koriste za povećanu penetraciju. U posebnim slučajevima, argonu se dodaju 5% vodika radi povećanja penetracije. Previsok udio vodika će izazvati poroznost. Legure nikla nisu osjetljive na pukotine izazvane vodikom poput čelika već kod nekih legura postoji mogućnost pada žilavosti ili pogoršanje s obzirom na pojavu drugih vrsta pukotina. Bez obzira na izbor

zaštitnog plina, moraju se koristiti keramičke sapnice većeg promjera kako bi se osigurala najbolja zaštita. Kod zavarivanja korijenskog prolaza, neophodno je koristiti plin za zaštitu korijena, argon ili helij. Zaštita korijena se može izostaviti ako će se korijen žlijebiti i ponovno zavarivati s korijenske strane [13]. Na slici 12 prikazano je TIG zavarivanje super legure Hastelloy C-22 u laboratoriju za zavarivanje, Fakulteta strojarstva i brodogradnje, u Zagrebu.



Slika 12. TIG zavarivanje Hastelloy C-22 legure

6.2. Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (MIG)

MIG postupak omogućuje veću količinu nataljenog materijala u usporedbi s TIG postupkom zavarivanja, ali je prisutna slabija kontrola penetracije i dodatnog materijala. Koristi se istosmjerna struja zavarivanja s elektrodom na pozitivnom polu, tj. DCEP konfiguracija. Dodatni materijal je u obliku gole žice specificiran prema istim standardima kao i dodatni materijali za TIG zavarivanje. Za zavarivanje tankih materijala najčešće se koristi prijenos materijala kratkim spojevima. Ako se koristi prijenos kratkim spojevima kod zavarivanja debljih materijala, postoji opasnost od grešaka vezivanja. Za zaštitne plinove koriste se mješavine argon-helij ili argon-helij-ugljični dioksid. Helij povećava energiju luka i poboljšava kvašenje, dok ugljični dioksid povećava stabilnost električnog luka. Udio

ugljičnog dioksida se mora ograničiti na maksimalno 2.5 % kako bi se izbjegla prevelika oksidacija. Već udio ugljičnog dioksida od 0.5 % je dovoljan da osigura pozitivan utjecaj.

Štrcajući luk osigurava MIG postupku veću količinu nataljenog materijala te se koristi za spajanje legura debljina od 10 mm nadalje. Štrcajući luk se koristi u vodoravnom (PA) položaju zbog velike i fluidne taline rastaljenog materijala. Suvišak topline može uzrokovati pojavu pukotina prilikom skrućivanja ili povećati osjetljivost u zoni utjecaja topline za neke legure, zbog toga, jačina struje se treba ograničiti na maksimalno 200 do 250 A. Kao zaštitni plin se koristi čisti argon.

Impulsno MIG zavarivanje nudi niz pogodnosti u odnosu na konvencionalne prijenose materijala. Kod rada s impulsnom strujom, kombinira se dobro kvašenje i tečnost štrcajućeg luka sa smanjenim srednjim unosom topline te boljom kontrolom u prisilnim položajima. Impulsna struja također povećava stabilnost električnog luka te smanjuje štrcanje u odnosu na prijenos materijala kratkim spojevima. Impulsni MIG se izvodi u zaštiti mješavina argon 75% - helij 25% ili argon – helij - ugljični dioksid.

Zavarivanje s jakom strujom ili s plinovima koji sadrže ugljični dioksid može uzrokovati oksidaciju površine zavara. Kod zavarivanja u više prolaza, poželjno je lagano pobrusiti između prolaza kako bi se izbjegle greške vezivanja. Kada se koristi prijenos štrcajućim lukom ili struje veće od 120 A, važno je upotrijebiti pištolje hladene vodom kako bi se izbjeglo pregrijavanje kontaktne cjevčice te naknadni problemi s dovodom žice [13].

6.3. Ručno elektrolučno zavarivanje (REL)

REL zahtijeva jednostavnu, prijenosnu opremu i može se koristiti u svim položajima tako da se ponekad preferira na terenu kod montaže ili popravaka. Ipak, REL nudi manju količinu nataljenog materijala u odnosu na MIG, zahtijeva čišćenje troske te ne postoji kontrola penetracije i oblika zavara kao kod TIG postupka. Obložene elektrode za REL zavarivanje su dostupne za većinu korozijski otpornih materijala te za neke toplinski otporne legure. REL je neprimjenjiv za legure koje sadrže reaktivne legirne elemente poput aluminija ili titana. Većina obloženih elektroda je specificirana u standardu AWS A5.11, iako postoje elektrode za neke specijalne legure koje nisu pokrivene standardom.

Većina elektroda za zavarivanje Ni legura koristi oblogu na bazi vapnenca i radi na pozitivnom polu istosmjerne struje tj. DCEP konfiguraciji. Metal zavara realiziran s postupcima koji sadrže trosku sadrže veći udio oksidnih uključaka nego što je slučaj kod postupaka koji koriste inertni zaštitni plin. Visok sadržaj kisika u metalu zavara ima značajan utjecaj na žilavost. Kada se zahtijeva maksimalna žilavost, kao što je to slučaj pri niskim

temperaturama, neophodno je koristiti postupke s inertnim plinom. Obloga elektrode će apsorbirati vlagu ako je izložena vlažnom zraku, što može dovesti do poroziteta ili smanjenja žilavosti, posebice u slučaju Ni-Mo legura. Elektrode za sve legure se prije upotrebe moraju čuvati u suhim pećima te dodatno sušiti prema preporukama proizvođača ako su bile izložene vlazi.

Odgovarajuća tehnika zavarivanja je kritična za izvođenje kvalitetnih zavora. Održavanje kraće duljine električnog luka sprječava poroznost. Kratka stanka prije prekidanja luka će zapuniti završni krater i spriječiti nastanak pukotina u krateru. Prekidna mjesta se moraju pretaliti kako bi se uklonile pukotine i porozitet. Zavarivanje u prisilnim položajima se izvodi s elektrodama promjera 3.2 mm ili manje te sa strujama na donjoj granici preporuke proizvođača [13].

6.4. Elektrolučno zavarivanje pod praškom (EPP)

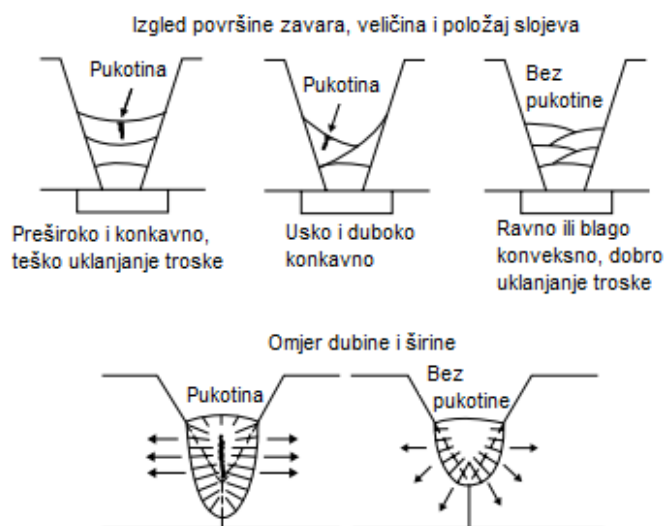
EPP postupak nudi velike količine nataljenog materijala te je prihvatljiv za određene legure, ali ako se pažljivo ne kontrolira može dovesti do problema. Kemijski sastav deponiranog metala zavora će se razlikovati od sastava žice zbog reakcije s praškom. Kao i kod REL postupka zavarivanja, EPP se ne može koristiti kod legura koje sadrže reaktivne legirne elemente. Metal zavora apsorbira silicij iz praška i gubi više reaktivne elemente poput kroma. Izbor praška je kritičan u minimalizaciji izmjene sastava. Neki prašci sadrže legirne elemente koji su nepoželjni kod određenih legura. Preporuča se visoko bazični prašak bez legirnih elemenata. Kako bi se ustanovili granični udjeli mora se provesti kemijska analiza deponiranog materijala zavora. AWS A5.11 specificira sastavne udjele i može se koristiti kao smjernica za većinu legura zavarenih EPP postupkom. Visoke struje zavarivanja mogu izazvati pukotine kod skrućivanja. Maksimalna struja od 250 A u kombinaciji s žicom promjera 1.6 mm osigurava dobre rezultate [13].

6.5. Elektrolučno zavarivanje praškom punjenom žicom (FCAW)

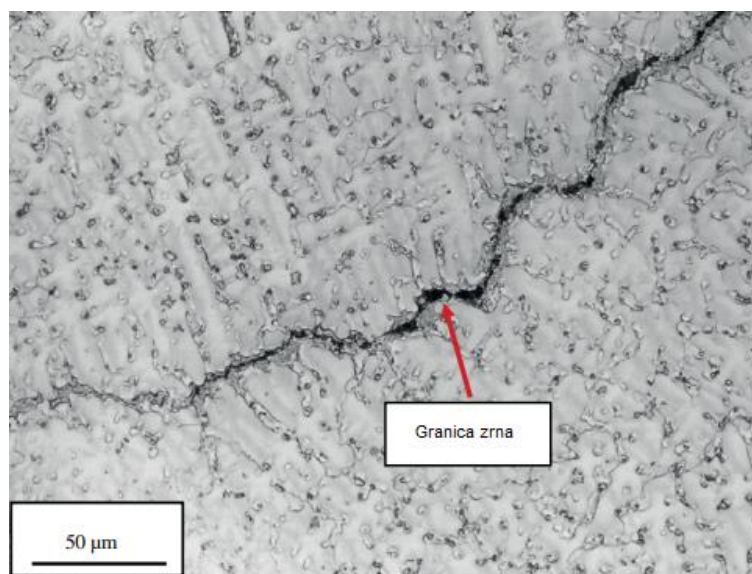
Za neke uobičajene korozijski otporne legure na bazi nikla kao što su 625 ili C-276 proizvođači dodatnih materijala za zavarivanje u ponudi imaju i praškom punjenu žicu. Ovaj postupak omogućava visoke količine nataljenog materijala sa dobrim oblikom zavora i dobrim kvašenjem. Za sada, praškom punjene žice za zavarivanje legura na bazi nikla nisu pokrivene AWS standardom. Zbog toga, neki proizvođači se koriste kemijskim sastavom i čvrstoćama specificiranim za obložene elektrode za zavarivanje legura nikla u AWS A5.11 [13].

7. KARAKTERISTIČNE POGREŠKE PRI ZAVARIVANJU Ni LEGURA

- **Tople pukotine:** uzrokovane su prisutnošću S, Pb, P, Bi i drugih niskotaljivih elemenata. Nečistoće ovih elemenata s površine interkristalno prodiru u unutrašnjost strukture i uzrokuju pukotine. Potrebno je brižljivo odmašćivanje i čišćenje rubova četkanjem četkama od nehrđajućeg austenitnog čelika u širini oko 25 mm sa svake strane zavora, jer će te zone biti zagrijavane zavarivanjem [12]. Na slici 13 prikazano je kako nepravilna tehnika prilikom zavarivanja može prouzrokovati pukotine. Dok je na slici 14 prikazano mikroskopsko nastajanje pukotine na granici zrna Ni legure.

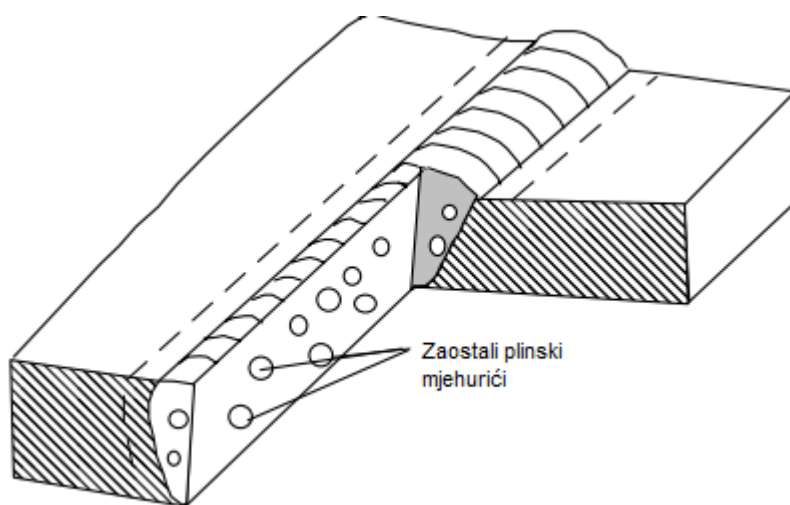


Slika 13. Pukotine uzrokovane nepravilnom tehnikom zavarivanja [25]



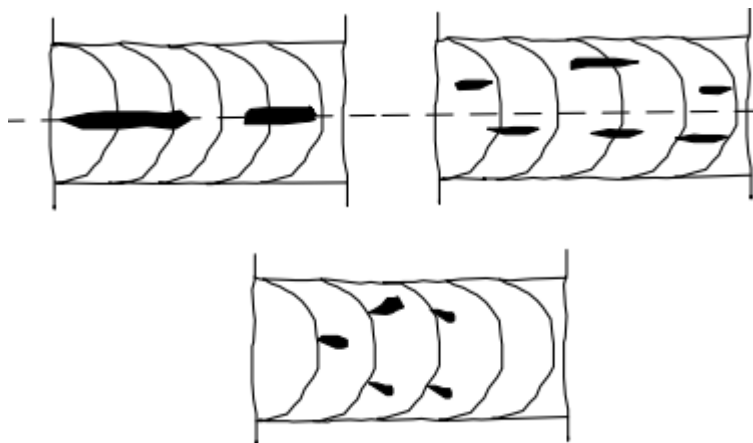
Slika 14. Prikaz nastajanja tople pukotine kod Ni legure [25]

- **Poroznost:** uzrokovana je prisustvom plinova: H, O, N, CO. Rastaljeni Ni otapa 2 puta više vodika, nego austenitni CrNi čelik, a 3 puta više nego obično konstrukcijski čelik. Tijekom hlađenja taline plinovi u obliku mjehurića naglo izranjaju, međutim postoji mogućnost da je brzina skrućivanja veća od brzine izlučivanja plinova, koji ostaju zarobljeni u zavaru. Izlazeći iz zavara plinski mjehurići ponekad ostavljaju vidljive šupljine na površini zavara. Veličine i oblici šupljih mjesta ovise o količini upijenog, odnosno izlučenog plina iz taline metala zavara i brzine skrućivanja (slika 15). Čistoća rubova, zaštitnog plina i držanje kratkog luka pri zavarivanju sprječavaju poroznost [12].

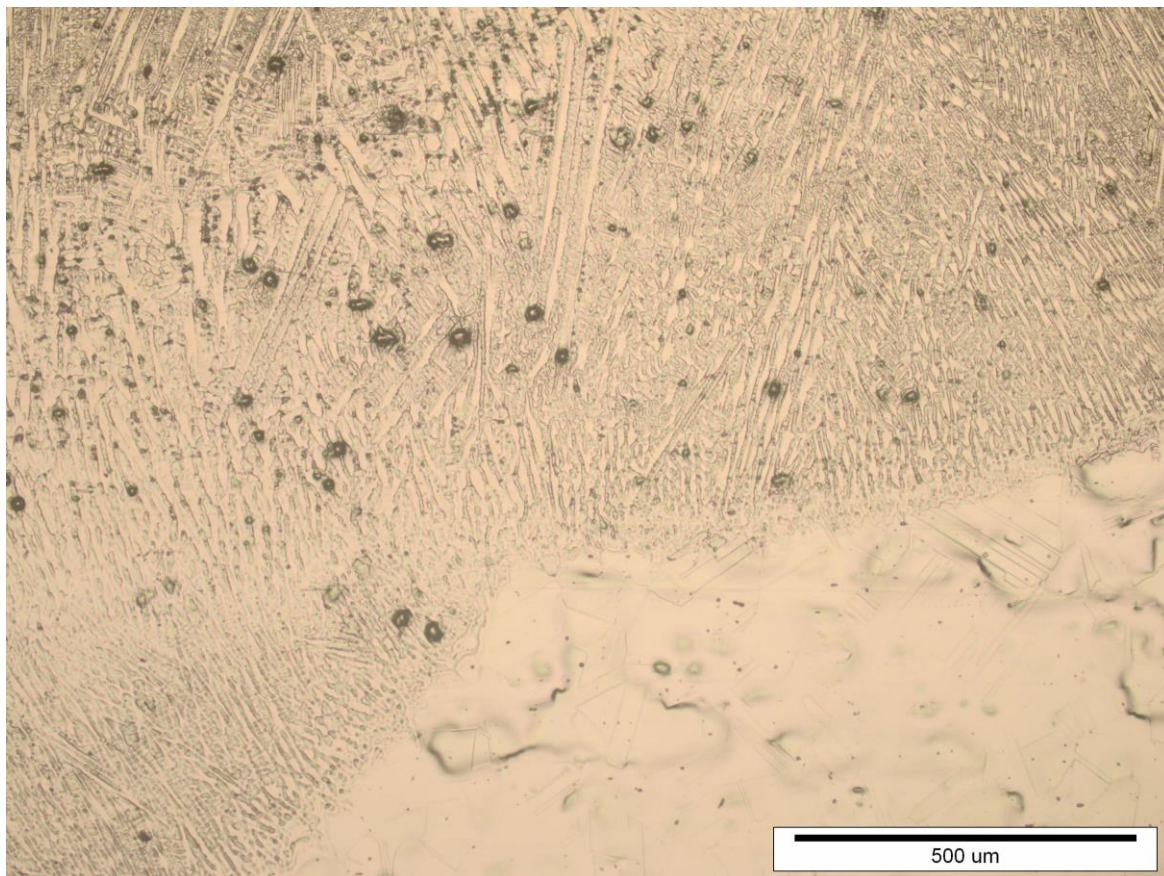


Slika 15. Prikaz zaostalih plinskih mjehurića u metalu zavara [26]

- **Oksidna kožica:** smeta pri zavarivanju, budući da Ni oksid ima višu točku taljenja, pa dolazi do greške vezivanja i oksidnih uključaka. Debeo sloj oksida se stvara pri zavarivanju, toplinskim obradama i toplinskim operacijama. Prije zavarivanja preporučuje se odstranjivanje oksida sa površine brušenjem, pjeskarenjem ili kemijskim nagrivanjem kiselinama. Osim grubih uključaka koji se relativno lagano mogu otkriti, može se naći još niz drugih sitnih uključaka koji su nastali u procesu zavarivanja, kao posljedica kemijskih reakcija, a to su: sulfidni, nitridni, fosfidni uključci. Nalaze se većinom na granicama kristala i usko su povezani s nastajanjem pukotina [12]. Na slici 16 dan je prikaz zarobljene troske u metalu zavara. Dok su na slici 17 prikazane nečistoće u zoni utjecaja topline kod legure C-22. Za smanjenje utjecaja oksidne kože potrebno je postupak zavarivanja pravilno izvoditi i čistiti oksidni sloj nakon svakog prolaza.



Slika 16. Prikaz zarobljenih uključaka u metalu zavara [26]

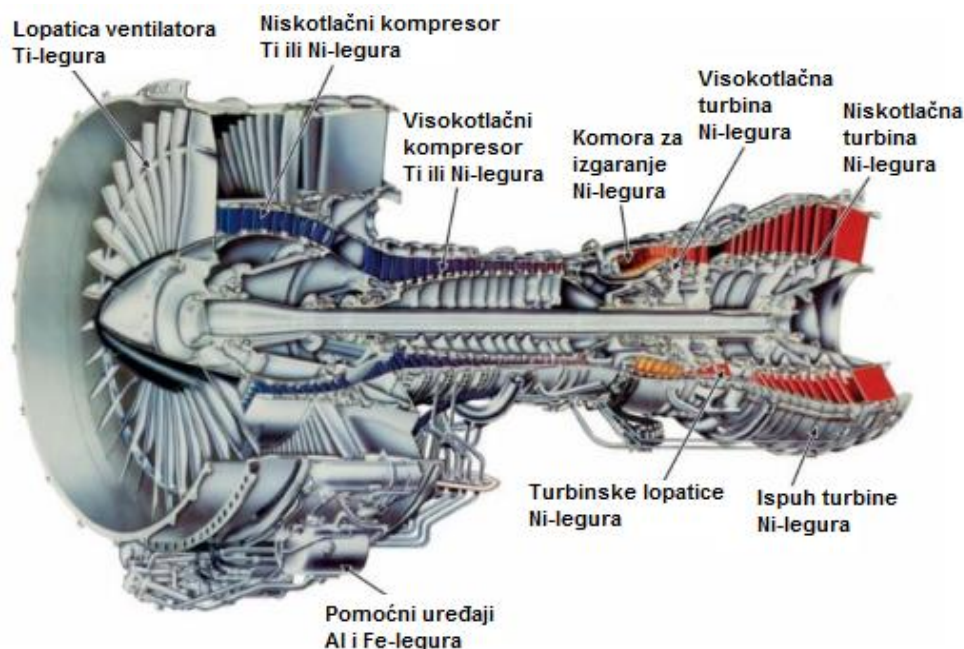


Slika 17. Prikaz uključina i oksida u liniji staljivanja zavarenog spoja legure C -22

8. PRIMJENA SUPERLEGURA NA BAZI NIKLA

Legure nikla su ponajprije razvijene zbog njihove otpornosti na koroziju i mehaničke otpornosti pri visokim temperaturama. Kako se vremenom povećavala potražnja za materijalima koji izdržavaju sve više radne temperature, došlo je do razvoja grupe materijala pod imenom super legure. Premda se ove legure uglavnom namijenjene primjenama pri visokim temperaturama, one se mogu rabiti i na niskim temperaturama jer zadržavaju visoku čvrstoću i dobru žilavost zahvaljujući kubičnoj plošno centriranoj FCC kristalnoj strukturi. Legure nikla pripadaju skupini najsloženijih super legura koje se rabe za toplinski izrazito opterećene dijelove. One mogu očvrsnuti kristalima mješancima kada je riječ o nižim radnim temperaturama ili precipitacijom intermetalnih faza kada se radi o visokotemperaturnim primjenama.

Super legure nikla trajno se mogu opteretiti do 1100 °C. Međutim, sposobne su kratkotrajno izdržati i više temperature, do 1400 °C, tako da se primjenjuju za toplinski i mehanički izrazito opterećene dijelove kao što su turbine zrakoplovnog motora, uređaji u energanama, postrojenja za preradu nafte i plina, farmaceutska i kemijska postrojenja. Na slici 18 prikazan je mlazni motor sa dijelovima izrađenim iz Ni legura ili drugih super legura [27].



Slika 18. Dijelovi mlaznog motora izrađenih iz super legura [27]

Lopatica turbine, prikazana na slici 19, predstavlja tipičan primjer uspješnosti primjene super legure nikla koja mora biti otporna na puzanje i pojavu mehaničkog i toplinskog umora uslijed čestih oscilacija naprezanja pri radnoj temperaturi kao i čestih temperaturnih skokova.



Slika 19. Lopatica visokotlačne turbine mlaznog motora [27]

Povoljno je da lopatica bude grubozrnate mikrostrukture ili još bolje monokristalne da bi se poboljšala otpornost puzanju [27].

9. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio rada proveden je u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. U laboratoriju za zavarivanje provedeno je zavarivanje ploča super legure Hastelloy C-22, dok je ispitivanje korozijske otpornosti osnovnog materijala i materijala zavara provedeno u laboratoriju za zaštitu materijala.

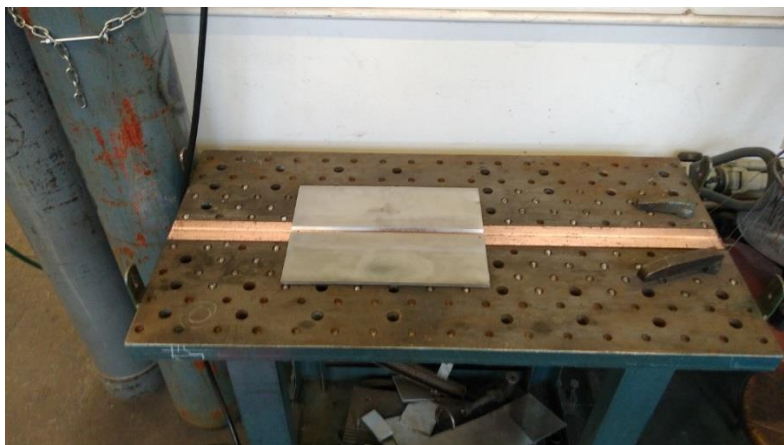
U okviru ovog eksperimenta analizirano je slijedeće:

- Mikro i makro struktura u osnovnom materijalu i dobivenom zavarenom spoju
- Elektrokemijsko ispitivanje korozijske postojanosti osnovnog materijala i metala zavara
- Kemijski sastav u dobivenom zavarenom spoju

Eksperiment je proveden u dva dijela. U prvom dijelu eksperimenta zavarene su dvije ploče osnovnog materijala Hastelloy C-22 dimenzija 350 x 120 x 6,35 TIG postupkom zavarivanja (postupak 141 prema EN ISO 4063:2012). Ploče su zavarene sučeljenim spojem, položaj PA prema EN 287:2012; uz primjenu bakrene podloške kroz koju struji zaštitni plin 100 % Ar, u svrhu zaštite korijena, te zaštitni plin koji struji kroz sapnicu pištolja, također 100 % Ar. U drugom su dijelu eksperimenta provedena ispitivanja osnovnog materijala i dobivenog zavarenog spoja.

9.1. Korištena oprema za izradu eksperimentalnog rada

Ploče su zavarivane TIG postupkom zavarivanja, na radnom mjestu Laboratorija za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, prikazanom na slici 20. Kao izvor struje za TIG zavarivanje korišten je „MagicWave 2200 Job G/F“ proizvođača Fronius, prikazan je na slici 21. Ovaj tip izvora je potpuno digitalno upravljiv AC/DC TIG izvor za zavarivanje koji se može koristiti i za REL zavarivanje. Najveća jakost struje zavarivanja koju ovaj uređaj može postići je 220 A pri intermitenciji od 35 %. Uređaj ima mogućnost TIG zavarivanja impulsnom strujom. Po potrebi, za maksimalna opterećenja, uređaj se dodatno oprema modularnim hladnjakom i TIG-gorionikom s vodenim hlađenjem [28]. Tehničke karakteristike navedenog izvora struje prikazane su u tablici 13.



Slika 20. Radno mjesto za zavarivanje



Slika 21. Uređaj za TIG zavarivanje Fronius MagicWave 2200 Job G/F

Tablica 13. Tehničke karakteristike izvora struje za zavarivanje [28]

Tip izvora struje	MagicWave 2200 Job G/F
Priključni napon	230 V (-20 % / + 15 %), 50 Hz
Strujni opseg TIG – AC/DC	3 – 220 A
Strujni opseg REL	10 - 180 A
Struja zavarivanja	Max 220 A
Intermitencija	35 %
Napon praznog hoda	88 V
Stupanj zaštite	IP 23
Dimenzije	485 x 180 x 390 mm
Težina	17,4 kg

Mjerenje međuprolazne temperature obavljeno je pomoću uređaja Fluke 568 prikazanog na slici 22.



Slika 22. Fluke 568 uređaj za mjerenje međuprolazne temperature

9.1.1. *Zaštitni plin*

U ovom eksperimentu korišten je zaštitni plin 100 % Ar, trgovačkog imena Argon 4.8 proizvođača Messer. Ovaj zaštitni plin pripada grupi II prema normi ISO 14175. Koristi se prilikom TIG/MIG zavarivanja aluminija, visokolegiranih čelika, čelika na bazi nikla i legura na bazi nikla. Korišten je isti zaštitni plin za zaštitu korijenskog prolaza i za zaštitu prilikom zavarivanja koji izlazi iz sapnice. Protok zaštitnog plina korijenskog prolaza iznosio je 4 l/min, dok je tokom zavarivanja protok kroz sapnicu iznosio 10 l/min.

9.1.2. *Osnovni materijal*

Osnovni materijal korišten u eksperimentu je super legura nikla Hastelloy C-22. Hastelloy C-22 legura (UNS N06022) jedna je od poznatih i dokazanih legura čije su glavne karakteristike otpornost na koroziju i ne-oksidirajuće kemikalije, otpornost na rupičastu koroziju, puknuća i

koroziju u pukotinama. Visoki sadržaj kroma pruža mnogo veću otpornost na oksidaciju medija od ostalih legura u skupini.

Kao i ostale legure nikla, Hastelloy C-22 je vrlo duktilna, pokazuje izvrsnu zavarljivost, i lako se izrađuje u industrijske dijelove. Dostupan je u obliku ploča, limova, traka, šipke, žice i cijevi [8]. Kemijski sastav legure dan je tablicom 14, a mehanička svojstva tablicom 15.

Tablica 14. Kemijski sastav superlegure Hastelloy C-22 [8]

C	Mn	Fe	V	Ni	Si	S	W	P	Co	Mo	Cr
max	max	min/max	max	max	max	max	min/max	max	max	min/max	min/max
0,015	0.50	2,0-6,0	0,35	56	0,08	0,02	2,5-3,5	0,02	2,5	12,5-14,5	14,5-20

Tablica 15. Mehanička svojstva superlegure Hastelloy C-22 [8]

	Vlačna čvrstoća [MPa]	Istezljivost [%]	Tvrdoća [HRB]
Toplo valjana ploča, 12 mm	744	73	84
Hladno valjani lim, 8 mm	752	69	84
Hladno valjani lim, 3 mm	782	57	86

Prema normi ISO/TR 15608 osnovni materijal spada u grupu 43, (Ni-Cr-Fe-Mo) Ni > 40 %.

9.1.3. Dodatni materijal

Dodatni materijal korišten za zavarivanje je 622 Nicros, proizvođača Daiko (oznaka SNi 6022, ERNiCrMo-10 prema normi EN ISO 18274). To je Ni-Cr-Mo žica za zavarivanje visoko legiranih materijala tipa 20Cr-25Ni s 4-6 % Mo i legura na bazi nikla. Metal zvara ima visoku otpornost na koroziju. Tablicom 16 prikazana su mehanička svojstva dodatnog materijala, dok je kemijski sastav dodatnog materijala dan tablicom 17.

Tablica 16. Mehanička svojstva dodatnog materijala Ni 6022 [29]

Mehanička svojstva dodatnog materijala Ni 6022				
Vlačna čvrstoća [MPa]	Granica razvlačenja [MPa]	Istezljivost [%]	Udarni rad loma (-196 °C) [J]	Tvrdoća HV [HB]
740	500	44	130	220

Tablica 17. Kemijski sastav dodatnog materijala [29]

%	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	W	V	Co	Cu	Fe
Min	-	-	-	-	-	20	49	12,5	2,5	-	-	-	2
Max	0,010	0,5	0,08	0,010	0,02	22,5	-	14,5	3,5	0,3	2,5	0,5	6
Tip	0,003	0,2	0,03	0,002	0,01	21	56	13,5	3	0,15	1,5	0,1	4

Za zavarivanje korijenskog prolaza koristila se žica promjera 1,6 mm, dok je za zavarivanje ostalih prolaza korištena žica promjera 2,4 mm.

Proizvođač dodatnog materijala već preporuča neke osnovne parametre koji su navedeni u specifikaciji, dok se unos topline računa prema izrazu:

$$Q = \eta \times \frac{U \times I}{v} \times 10^{-3} \text{ kJ/mm} \quad (1)$$


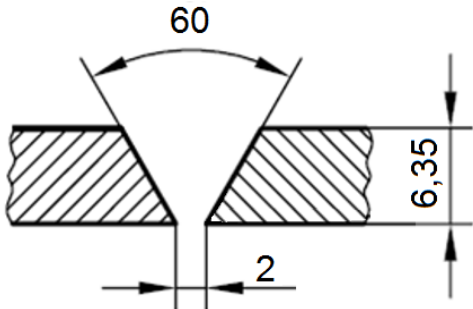
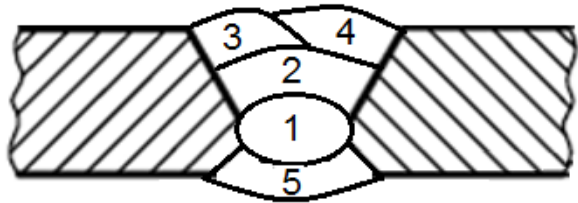
Gdje je:

Q – unesena toplota, kJ/mm; U – napon zavarivanja, V; I – jakost struje zavarivanja, A;

v – brzina zavarivanja, mm/s;

η – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja koji za TIG postupak prema HRN EN 1011-1 iznosi 0,6.

9.1.4. Specifikacija postupka zavarivanja

	Uputa za zavarivanje Welding Procedure Specification EN ISO 15609-1				No.	1.				
					Page No.: 1/1					
Projekt:		Datum:		2.7.2018.						
Eksperiment		Ispitna ustanova:		FSB						
PQR No.:		-		Osnovni materijal:		Legura C-22				
WPS No.:		1.		(43)						
Proizvođač:		FSB		Dimenzije:		t = 6,35 mm				
Postupak zavarivanja:		141		Izradio:		Marin Tomišić				
Priprema spoja:		V		Pregledao:		Ivica Garašić				
										
Prolaz:	Postupak zavarivanja	Smjer zavarivanja	Dodatni materijal:		Parametri			Brzina žice [m/min]	Brzina zav. [cm/min]	Unos toplin e [kJ/mm]
			Klasa	Promjer	Struja [A]	Napon [V]	Pol			
1	141	PA	Ni 6022	1,6	85	9,8	-	/	6	0,50
2-n	141	PA	Ni 6022	2,4	110	10,7	-	/	7,5	0,56
Plin	Mješavine [%]	Protok [l/min]	Temperatura predgrijavanja:		-			Naknadna toplinska obrada		
Zaštitni:	(ISO 14175 M12) 100 % Ar	10	Međuslojna temperatura:		max 80 °C			-		
Zaštita korijena:	(ISO 14175 II) 100% Ar	4								

9.2. Tijek zavarivanja

Nakon izrađene specifikacije zavarivanja, provodi se sam postupak. V priprema spoja provodi se strojnom obradom prema normi EN ISO 9692. Priprema spoja i pripoji koji su napravljeni TIG postupkom prikazani su slikom 23. Čistoća ploča za zavarivanje iznimno je važna jer nečistoće poput masti i ulja, sumpora, fosfora, olova, bizmuta ili bora koji mogu biti prisutni u strojnim ili reznim tekućinama, pogoduju nastanku korozije, te mogu uzrokovati snižavanje čvrstoće materijala. Zbog navedenih razloga ploče se dodatno čiste acetonom i svi alati korišteni prilikom zavarivanja moraju biti prikladni za zavarivanje super legure C-22.

Ploče su očišćene od prašine i masnoće alkoholom sa čistom krpom, te potom su obrisane čistim papirom. Zavarivač je imao potpuno nove, nekoristene rukavice za TIG zavarivanje. Korištena je čista, nova sapnica, te nova četka od nehrđajućeg čelika za čišćenje između prolaza.



Slika 23. V priprema spoja i pripoji napravljeni TIG postupkom

Zavarivanje se provelo uz jedan korijenski prolaz, tri prolaza popune i uz jedan suprotan korijenski prolaz. Korijenski prolaz se morao popraviti sa suprotne strane zbog nepotpunog provara prvog korijenskog prolaza. U tablici 18 prikazani su parametri svakog prolaza zasebno kako su se mijenjali tokom zavarivanja, koji odstupaju za male vrijednosti od propisanih parametara u specifikaciji. Zavarivalo se istosmjernom strujom (DC), s elektrodom na (-) polu.

Tablica 18. Parametri zavarivanja tokom eksperimenta

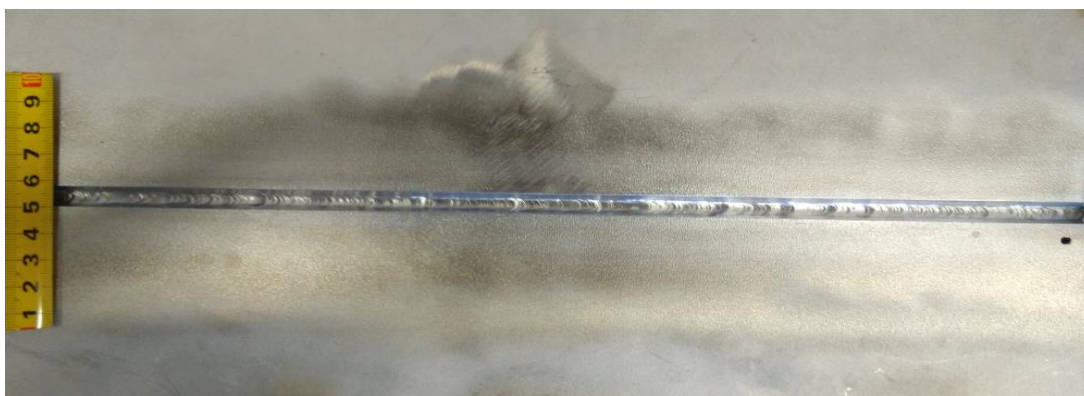
Prolaz br.	Struja zavarivanja, [A]	Napon zavarivanja, [V]	Brzina zavarivanja, [cm/min]	Unos topline, [kJ/mm]	Protok plina, l/min	
					Zaštita korijena	Zaštitni
Korijen	85	9,8	6,55	0,46	4	10
1	120	10,15	8,14	0,54	4	10
2	110	10,75	8,10	0,53	4	10
3	110	10,8	6,67	0,64	4	10
S. korijen	110	10,7	8	0,53	-	10

Najveća dopuštena međuprolazna temperatura bila je 80 °C, na slici 24 prikazano je njezino mjerenje uz pomoć uređaja Fluke 568.

Nakon svakog pa i završnog prolaza potrebno je zavar dobro očistiti od površinskih oksida, četkati čistom četkom od nehrđajućeg čelika. Na slikama 25, 26, 27, 28 i 29 prikazani su izvedeni zavari zabilježenim parametrima. Kod svih prolaza električni luk bio je stabilan te su zavari bili jednolični uz pravilnu raspodjelu taline.



Slika 24. Mjerenje međuprolazne temperature



Slika 25. Korijski prolaz



Slika 26. Prvi prolaz popune



Slika 27. Drugi prolaz popune



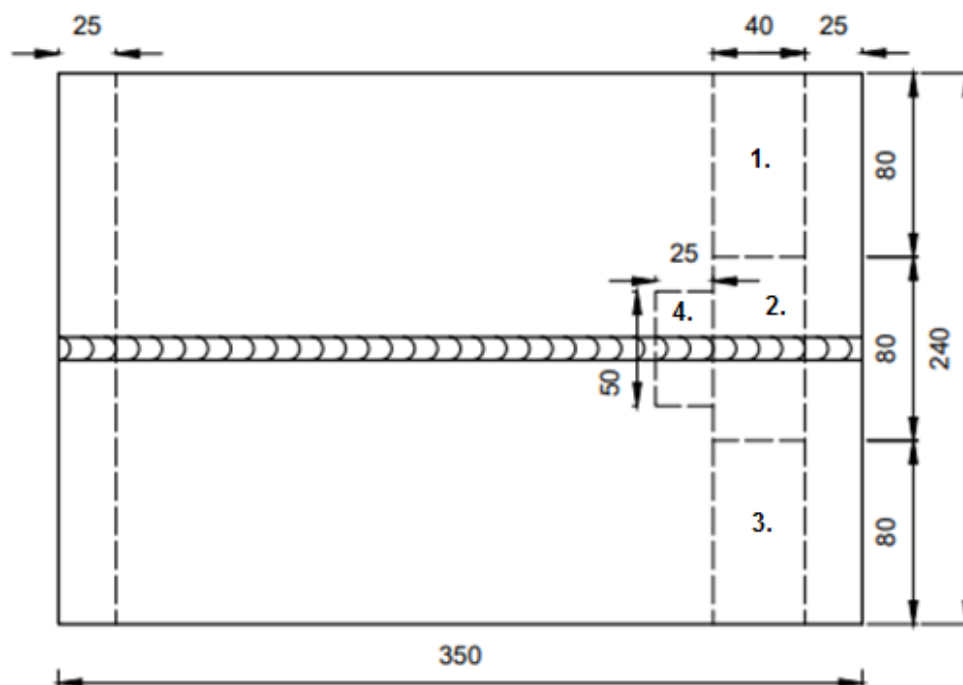
Slika 28. Treći prolaz popune



Slika 29. Popravak korijenskog prolaza sa suprotne strane

9.3. Priprema uzoraka za ispitivanje

Nakon zavarivanja dvije ploče $350 \times 120 \times 6,35$ potrebno je pripremiti uzorke za ispitivanje. Na slici 9 prikazane su zavarene ploče u tlocrtu. Linije koje su napravljene isprekidano su linije rezanja na tračnoj pili. Na krajevima ploča izrezani su dva uzorka širine 25 mm koji se odbacuju zbog toga što se u rubnim dijelovima ploča prilikom uspostavljanja i gašenja električnog luka javlja nejednolika struktura zavora te taj dio ploča nikako nije referentan uzorak za ispitivanje. Uzorci 1, 2 i 3 (slika 30) dimenzija 80×40 izrezani su za ispitivanja otpornosti na koroziju. Uzorci 1 i 3 su uzorci osnovnog materijala, dok je 2 uzorak materijala zavora. Uzorak 4 (slika 30) dimenzija 50×25 , izrezan je za makro i mikro analizu.



Slika 30. Zavarena ploča legure C-22, $350 \times 120 \times 6,35$

9.4. Ispitivanje makroizbrusaka

Nakon izrezivanja tračnom pilom makroizbrusak „4“ je ručno brušen brusnim papirima PAP, granulacije P180, P320, P500, zatim je strojno poliran papirima granulacije 1000, 2000, 4000. Tako pripremljen uzorak nagrizan je elektrokemijski 10 % - tnom oksalnom kiselinom ($C_2H_5O_4$) u vremenskom razdoblju od 20 s, pri naponu 6 V i struji 5 A.

Izradom makroizbruska dobiva se uvid u geometriju zavarenog spoja, zonu taljenja materijala te intenzitet taljenja osnovnog materijala. Na slici 31 prikazan je navedeni uzorak na kojem se jasno vide svaki prolazi zavarivanja te utjecaj topline.



Slika 31. Makroizbrusak „4“

Programom „ImageJ“ izmjereno je nadvišenje i širina lica zavora te nadvišenje i širina korijena zavora. Program mjeri duljine na način da se kalibrira pomoću neke poznate dužine sa slike i iz te dužine izračuna duljinu piksela na osnovu čega dalje mjeri bilo koju dužinu sa slike. Izmjerene vrijednosti su prikazane u tablici 19.

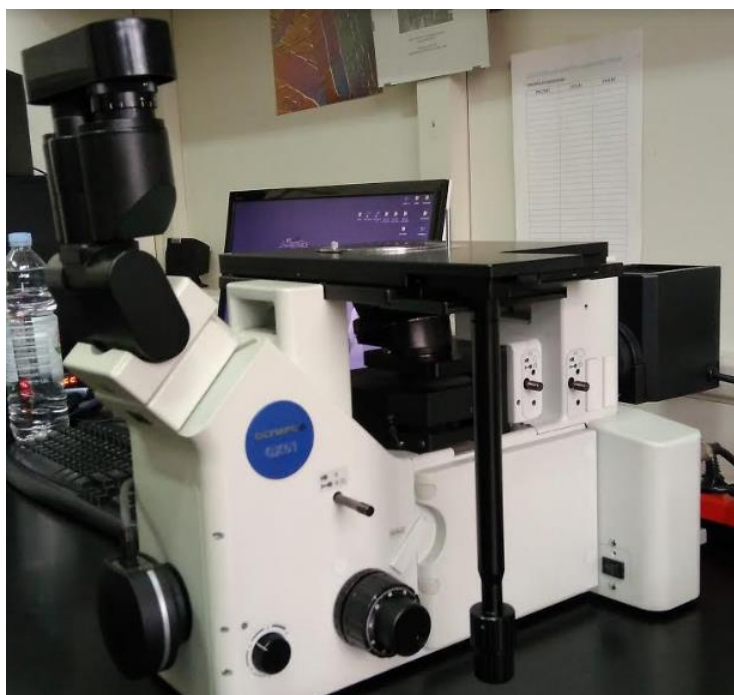
Tablica 19. Dimenzije zavarenog spoja

Makroizbrusak 4	Lice zavara		Korijen zavara	
	Nadvišenje, mm	Širina, mm	Nadvišenje, mm	Širina, mm
	1	13	1,5	9

Na makroizbruscima golim okom jasno je vidljiva zona utjecaja topline i prolazi. Izmjereno nadvišenje korijena zavora (1,5 mm) veće je od nadvišenja lica zavora (1 mm) zbog popravnog korijenskog prolaza sa suprotne strane ploča. Širina korijenskog zavora također je neprirodna u odnosu na širinu lica zavora upravo radi navedenog razloga.

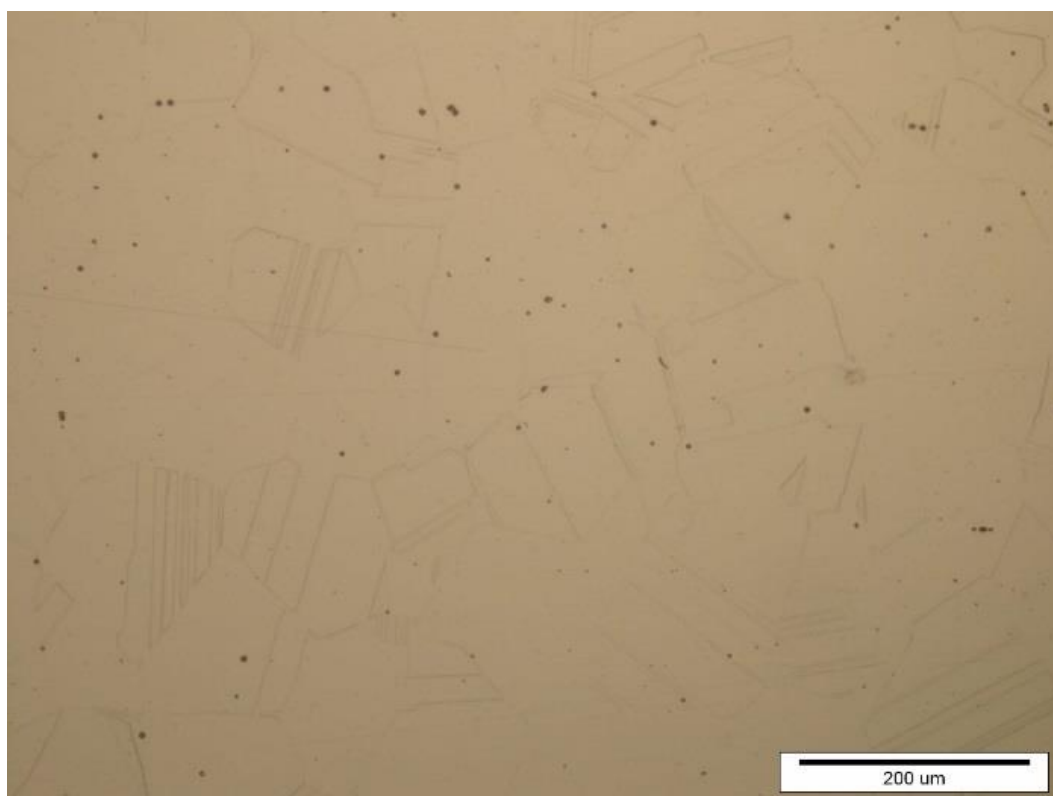
9.5. Analiza mikrostrukture

Mikrostruktura makroizbruska snimana je svjetlosnim mikroskopom Olympus GX51 (slika 32), u Laboratoriju za metalografiju Zavoda za materijale, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Uvećanje mikroskopa je u rasponu od 50 do 1000 puta i ima sposobnost razlučivanja mikrostrukturnih dijelova do $0,2\ \mu\text{m}$.

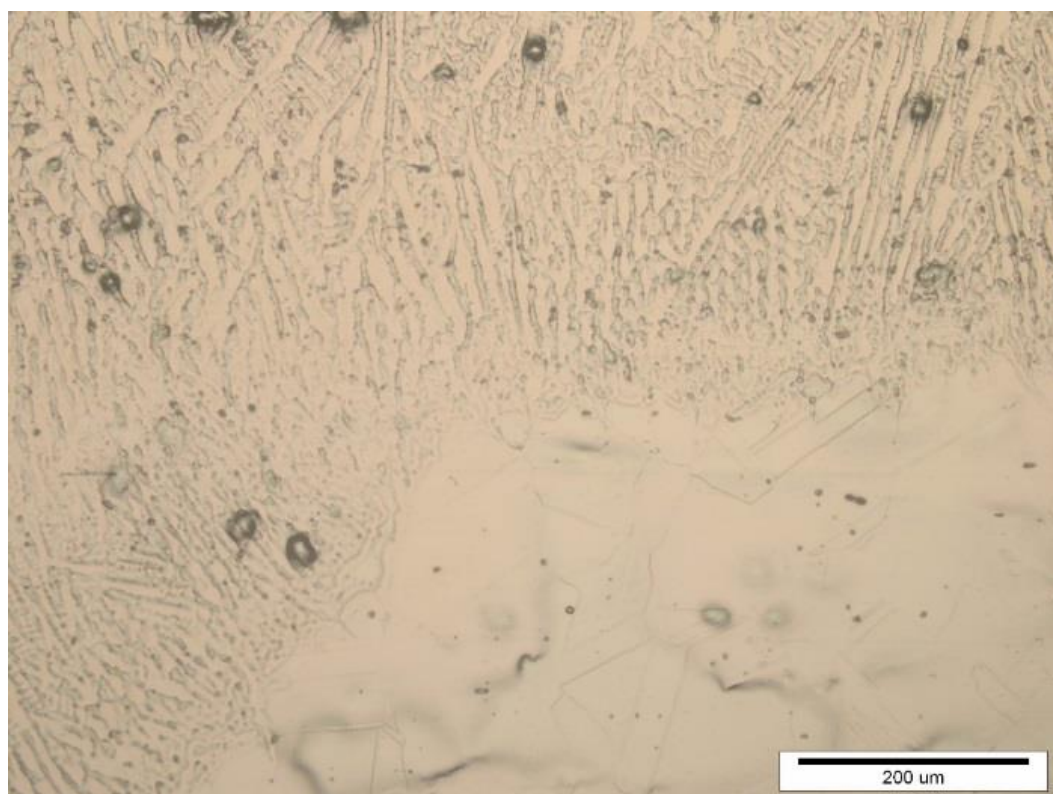


Slika 32. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51

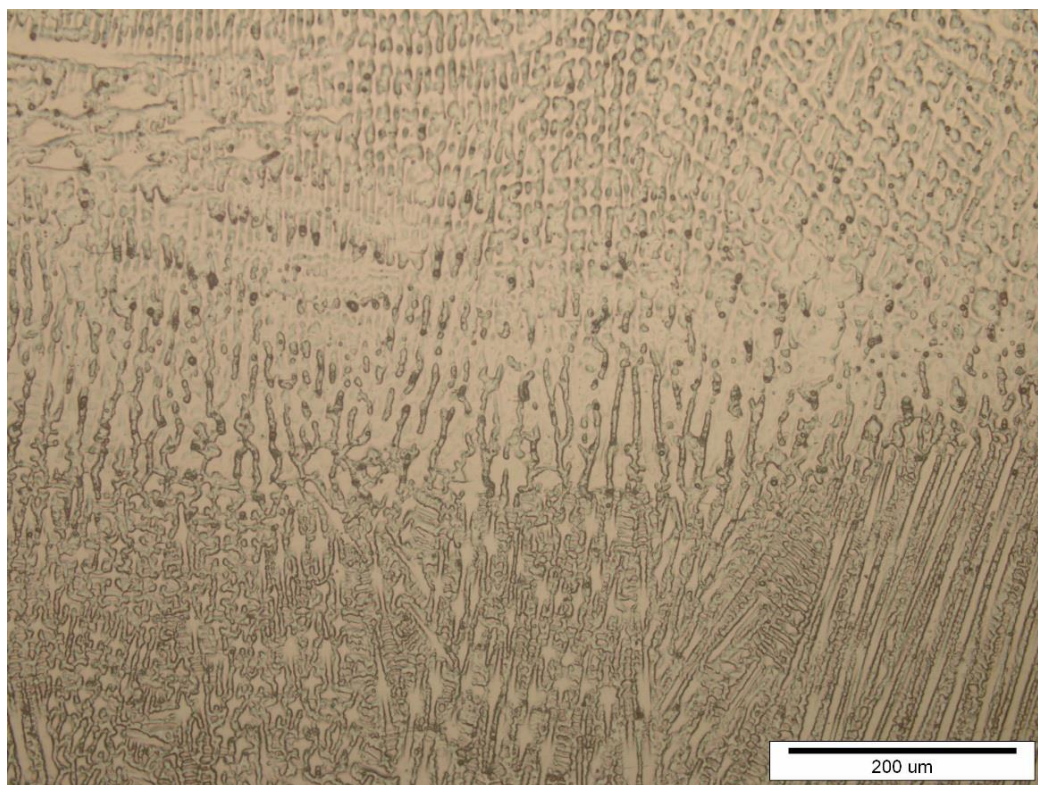
Kod zavarenog uzorka izvršila se analiza mikrostrukture osnovnog materijala u usporedbi sa mikrostrukturom metala zavora. U slijedećim slikama (33, 34, 35, 36, 37) prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala, zone utjecaja topline i svakog prolaza zasebno. Slike su uz pomoć mikroskopa uvećane 200 puta.



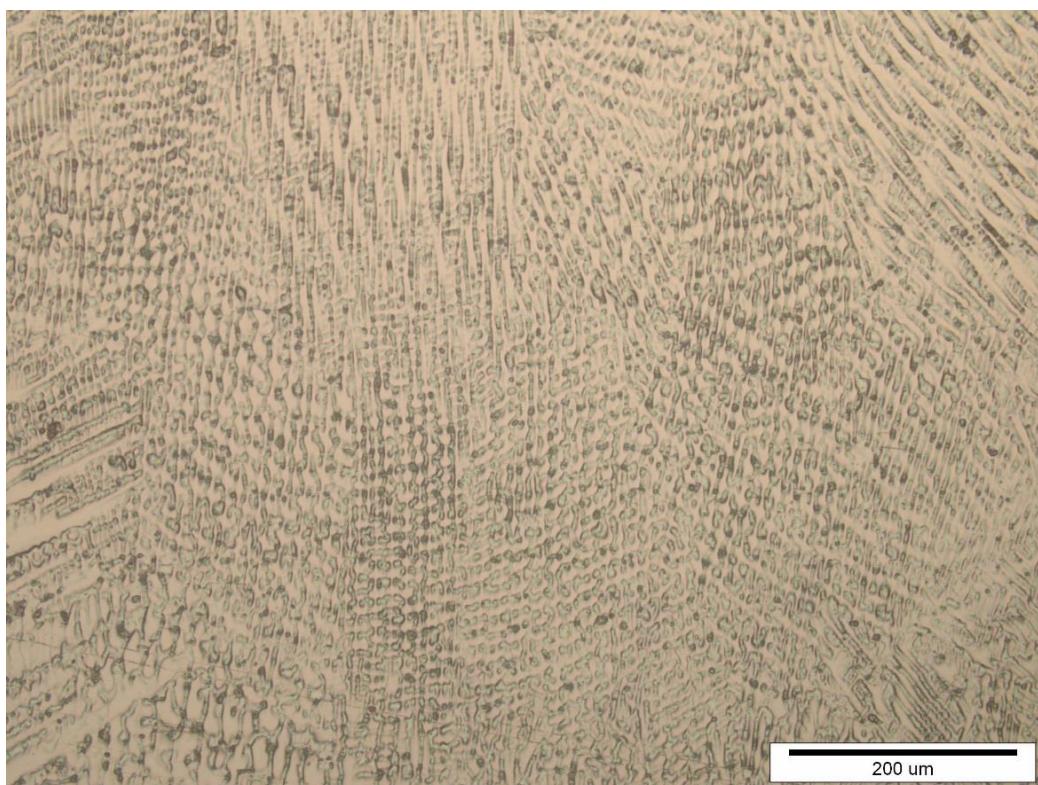
Slika 33. Mikrostruktura osnovnog materijala



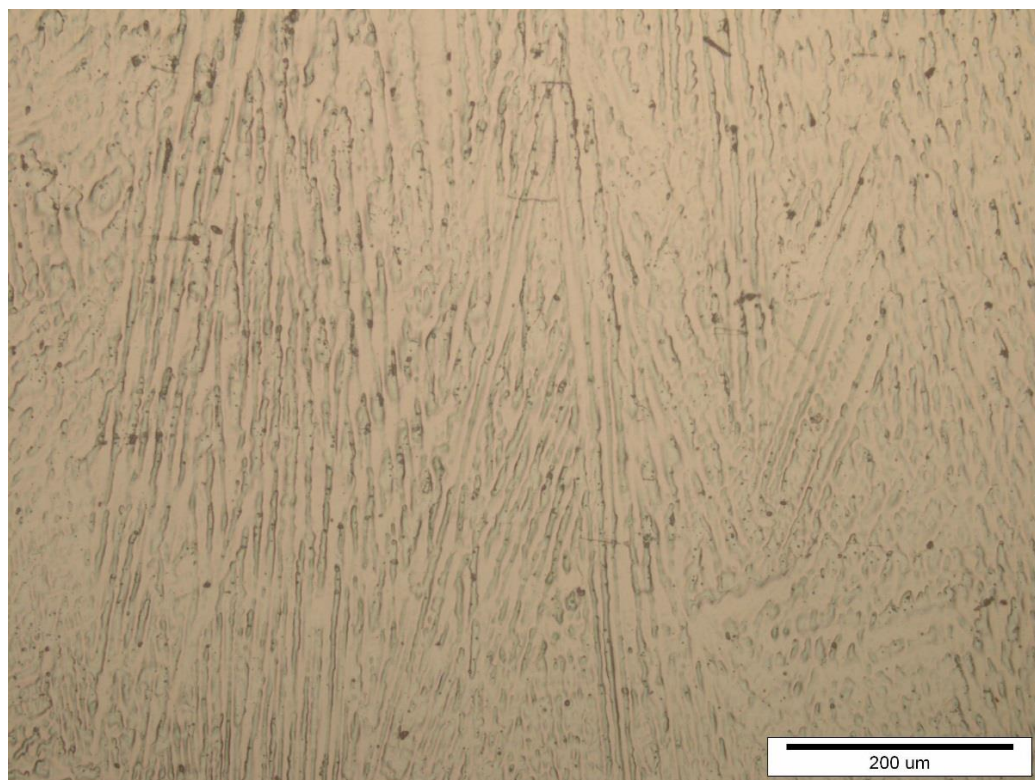
Slika 34. Mikrostruktura zone utjecaja topline



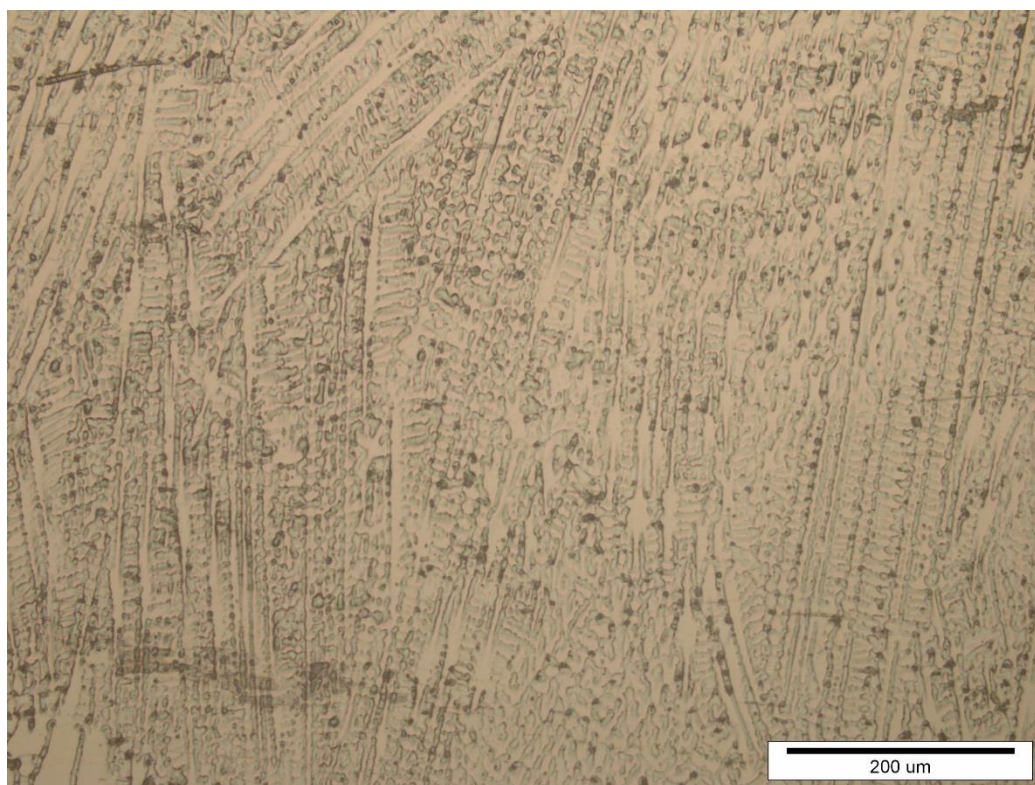
Slika 35. Mikrostruktura korijenskog prolaza



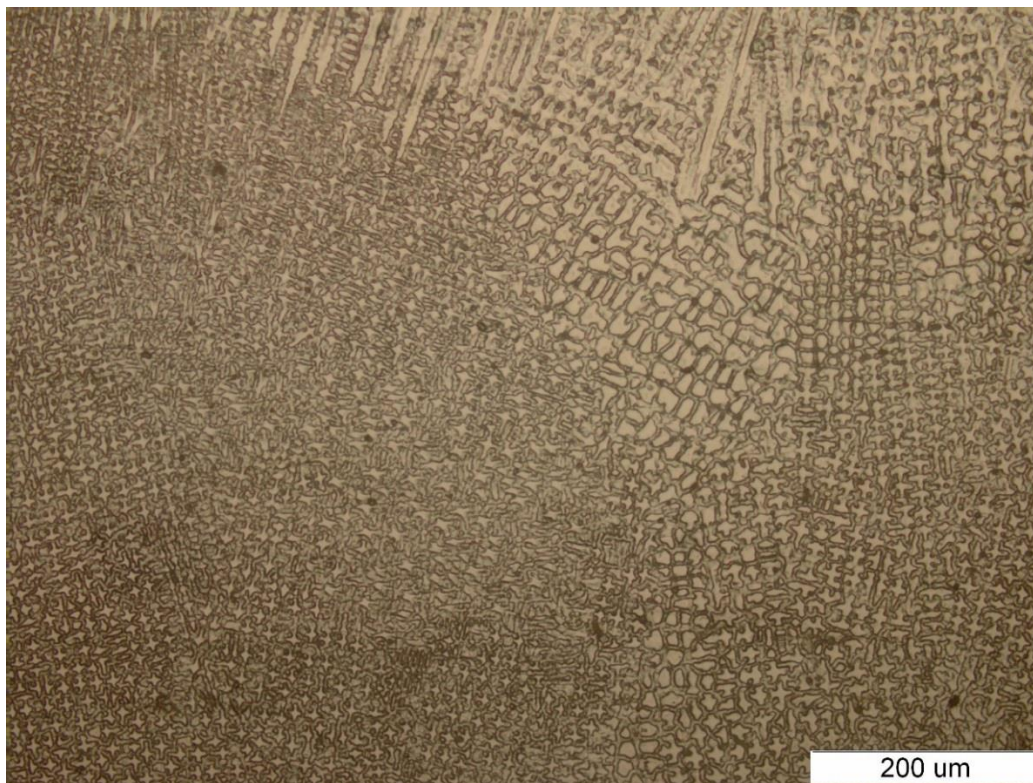
Slika 36. Mikrostruktura prvog prolaza



Slika 37. Mikrostruktura drugog prolaza



Slika 38. Mikrostruktura trećeg prolaza



Slika 39. Mikrostruktura popravka korijenskog prolaza

Na slici koja prikazuje mikrostrukturu osnovnog materijala nisu vidljive nikakve nepravilnosti ni iskakanja iz okvira C-22 mikrostrukture. Prevladava monofazna austenitna mikrostruktura, sa pokojim uključkom karbida. Uočavaju se tek jednoliko raspoređeni precipitati, gruba zrna, netopljeni legirni elementi te usmjerene nakupine po sredini snimljene slike koje ne predstavljaju problem.

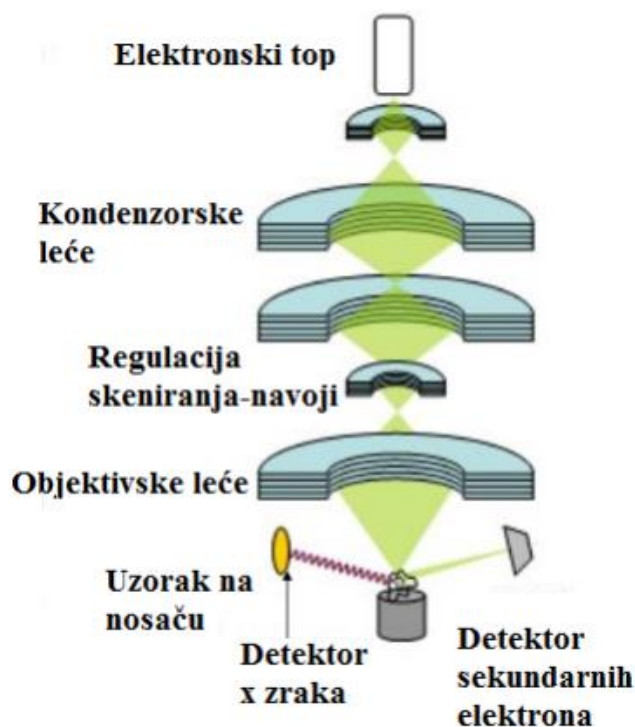
Na prijelaznom području (zona utjecaja topline) jasno se vidi prijelaz karakteristične austenitne mikrostrukture u razgranati tip mikrostrukture. Kod mikrostrukture zone utjecaja topline vidljiv je smjer rasta zrna uslijed hlađenja, to je vidljivo dalje i kod mikrostrukture zavara da se ona razlikuje u odnosu na mikrostrukturu osnovnog materijala. Vidljiv je prirast karbidne faze, koja pospešuje otpornost prema puzanju.

Vidljivo je da se svakim novim prolazom zavara mikrostruktura pretvara u razgranatu dendritnu mikrostrukturu koja ima oblik krošnji stabala, te se uočava jasna granica između zrna kristalizacije. Dakle zrna su promijenila svoj uzdužni oblik (karakteristično za ploče proizvedene valjanjem) u razgranati tip.

9.6. Analiza mikrostrukture na elektronskom mikroskopu

Dodatna analiza mikrostrukture provedena je na pretražnom elektronskom mikroskopu (SEM) u Laboratoriju za materijalografiju na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Pretražna elektronska mikroskopija (SEM - eng. Scanning Electrone Microscope) jedna je od najčešće korištenih metoda u karakterizaciji površine materijala. SEM uređaji rade na povećanjima od 10 do preko 500000, pa osim morfologije mogu poslužiti i za saznavanje informacija o kemijskom sastavu materijala blizu njegove površine. U standardnom SEM ispitivanju generira se snop primarnih elektrona fokusiran u točku promjera oko 5 nm, s energijama elektrona koje variraju od 100 eV do 50 keV. U slučaju neelastičnog rasipanja primarni elektroni predaju dio svoje energije elektronima u materijalu, čime se stvaraju uvjeti za njihovu emisiju u vidu sekundarnih elektrona koji obično imaju energiju manju od 50 eV. Dio neelastično predane energije primarnih elektrona dovodi i do pobuđivanja elektrona iz elektronskih ljuski atoma, a tako pobuđeni atomi vraćaju se u osnovno stanje (snopom fotona X zračenja). Dio elastično rasutih primarnih elektrona vraća se iz materijala kroz površinu (s vjerojatnošću proporcionalnoj atomskom broju) [16]. Na slici 40 prikazan je princip rada SEM-a. Dok je na slici 41 prikazano radno mjesto na kojem se ispitivanje provodilo, u Laboratoriju za tribologiju, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

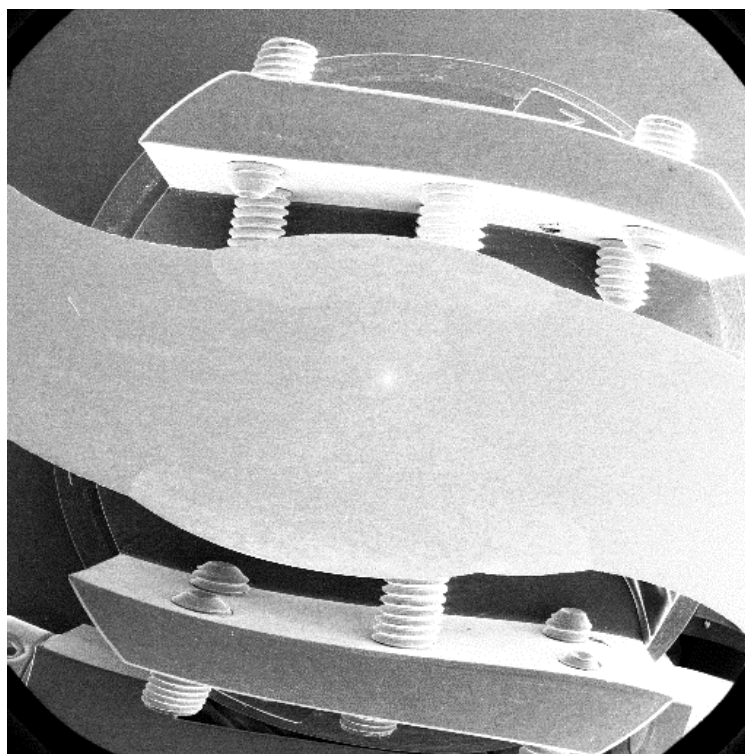


Slika 40. Princip rada SEM mikroskopa [16]



Slika 41. Tescan Vega TS5136 – Pretražni elektronski mikroskop (SEM)

Nakon što je uzorak detaljno očišćen i elektrokemijski nagrizan oksalnom kiselinom kao što je ranije navedeno, uzorak se postavlja na rotirajući nosač u vakumsku komoru SEM-a (slika 42).



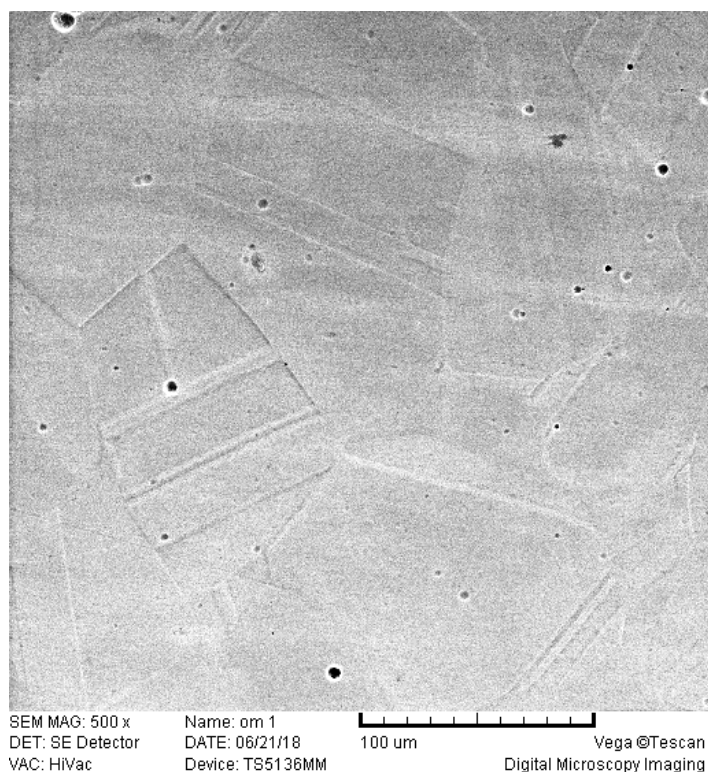
SEM MAG: ---
DET: SE Detector
VAC: HiVac

Name: 1
DATE: 06/21/18
Device: TS5136MM

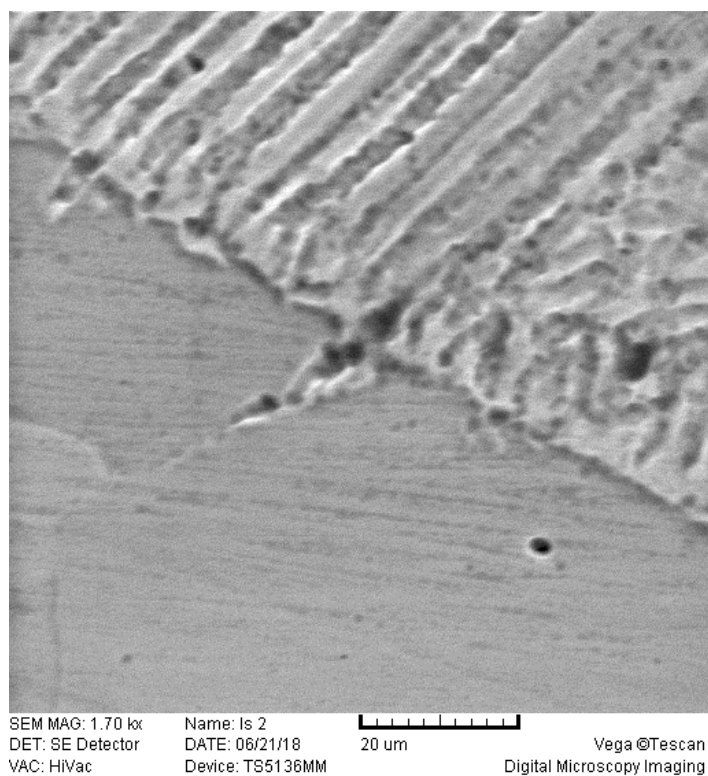
Vega ©Tescan
Digital Microscopy Imaging

Slika 42. Uzorak na rotirajućem nosaču u komori SEM-a

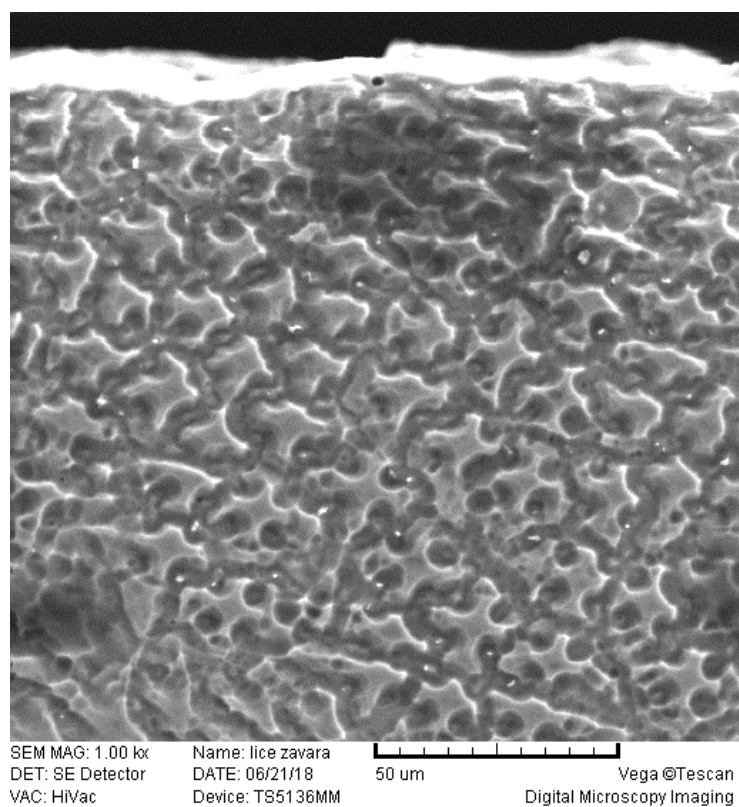
SEM analizom promatrana je mikrostruktura osnovnog materijala, linije staljivanja, lica zavara i zavara, slike 43, 44, 45, 46. Slike su napravljene s povećanjem od 500, 1000 i 1700 puta.



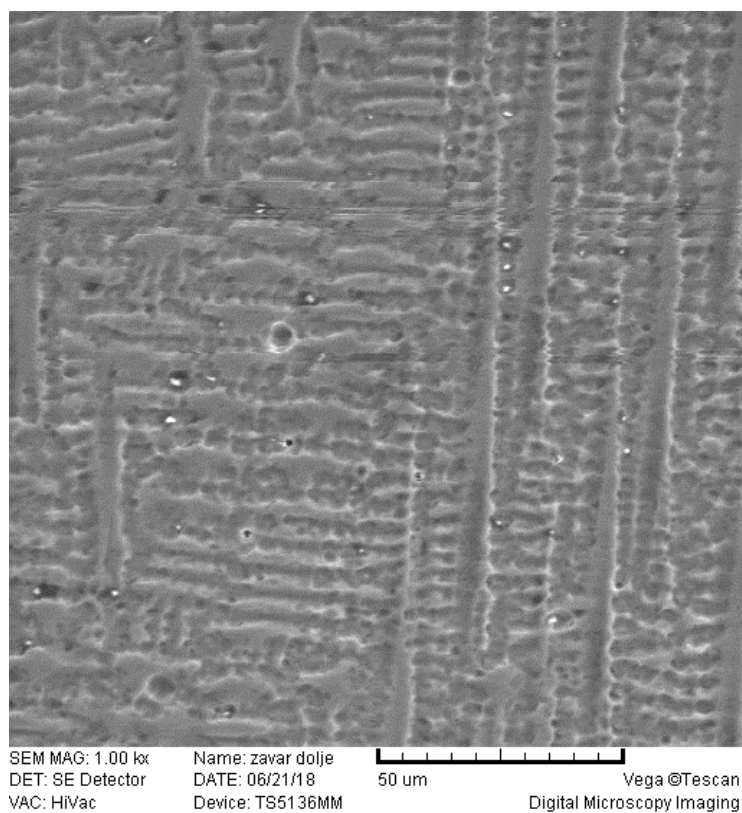
Slika 43. Osnovni materijal uzorka uz povećanje 500 x



Slika 44. Linija staljivanja uzorka uz povećanje 1700 x



Slika 45. Lice zavara uzorka uz povećanje 1000 x

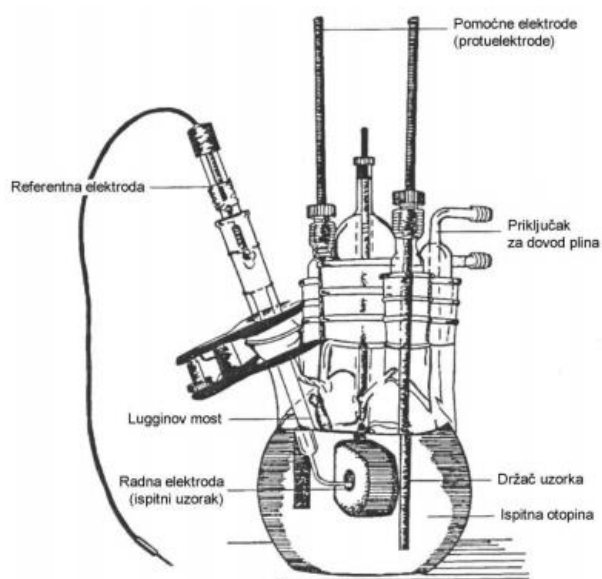


Slika 46. Zavar dolje uzorka uz povećanje 1000 x

Na slici 43 vidljiva je potpuna austenitna grubozrnata struktura. Granice zrna jasno su vidljive, te ne postoji mogućost usitnjavanja zrna. Kod linije staljivanja (slika 44) jasno se razaznaje granica između osnovnog materijala i metala zavara te su vidljive blage ukljućine (nepravilnosti). Kod metala zavara (slika 45, 46) vidljiva je dendritna struktura razgranatog tipa. Nema veće razlike između navedenih područja zavara, osim usmjerenosti dendritne mikrostrukture, bez većih uočenih nepravilnosti. Navedene činjenice ukazuju da je postupak zavarivanja izveden pravilno sa odgovarajućim parametrima.

9.7. Elektrokemijska korozijska ispitivanja

Elektrokemijska ispitivanja se provode u svrhu različitih spoznaja poput promatranja termodinamičkih podataka kojima se opisuje reakcija ili radi stvaranja nestabilnih posrednika, poput radikalnih iona te proučavanja njihove brzine raspadanja ili spektroskopska svojstva [30]. Za određivanje intenziteta korozije primjenjuju se različite elektrokemijske mjerne tehnike zbog samog procesa korozije koji je elektrokemijske prirode. Postoje dvije elektrokemijske mjerne tehnike, a to su tehnike s istosmjernom strujom (DC-tehnike, engl. direct current technics) i tehnike s izmjeničnom strujom (AC-tehnike, engl. alternating current technics). Elektrokemijska korozijska ispitivanja istosmjernom strujom primjenjuju polarizacijske metode mjerenja, potencijostatsku i galvanostatsku polarizaciju. Kod polarizacijskih mjerenja se prati odziv sustava na koji se djeluje signalom izvana te se kao rezultat mjerenja dobiva krivulja polarizacije struja-napon [31]. Na slici 47 prikazan je raspored elektroda u ćeliji prilikom elektrokemijskih ispitivanja.



Slika 47. Tipični raspored elektroda pri elektrokemijskim ispitivanjima [31]

Elektrokemijska ćelija se sastoji od radne elektrode (ispitivani metal/uzorak), referentne elektrode (zasićena kalomel elektroda, Ag/AgCl ili Cu/CuSO₄) i pomoćne elektrode (grafit ili platina).

9.7.1. Elektrokemijsko ispitivanje korozijskog djelovanja (DC)

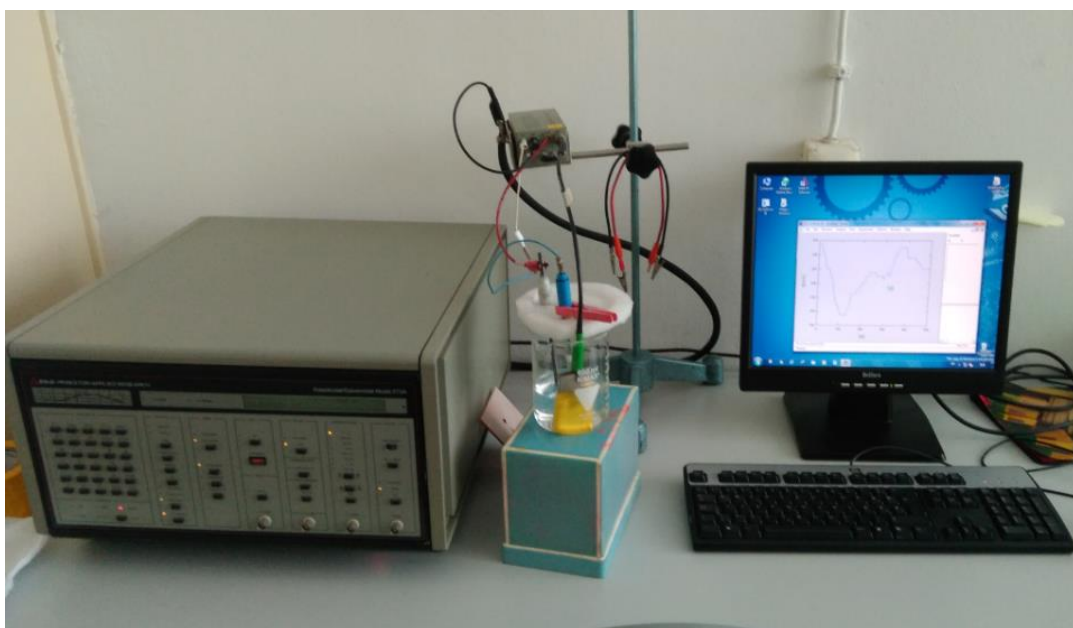
Elektrokemijska korozijska DC ispitivanja super legure nikla Hastelloy C-22 provedena su sukladno normi ASTM G5-94 na uređaju Potentiostat/Galvanostat Model 273A EG&E uz primjenu programa SoftCorr III u Laboratoriju za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Mjerenja su provedena u odnosu na referentnu zasićenu kalomel elektrodu (ZKE) poznatog potencijala +0,242 V prema standardnoj vodikovoj elektrodi.

Uzorci 1, 2 i 3 (slika 30) pripremljeni su za elektrokemijsko ispitivanje otpornosti na koroziju. Brušeni su na brusnom papiru granulacije P180, P320 i P500 te su kasnije polirani papirom granulacije 1000, 2000 i 4000. Na uzorcima 80x40x6,35 ispituje se 1 cm² te se ostali dio mora dobro izolirati, slika 48. Uzorci se uranjaju u 3.5 % NaCl. Na slici 49 prikazano je radno mjesto u laboratoriju, na slici je vidljiv uređaj Potentiostat/Galvanostat Model 273A EG&E, ćelija u kojoj je uronjen uzorak u elektrolit te referentna (zasićena kalomel elektroda) i protuelektroda (platina) spojeni na uređaj. Ispitivanje se provodilo na sobnoj temperaturi. Mjerenja su se provodila pri temperaturi od (20±2)°C.



Slika 48. Pripremljeni uzorci za ispitivanje

Na uređaju su provedena mjerenja korozijskog potencijala (potencijal otvorenog strujnog kruga), mjerenje polarizacijskog otpora, brzina korozije uz pomoć Tafelove ekstrapolacije te je izvedena metoda cikličke polarizacije.



Slika 49. Potentiostat/Galvanostat Model 273A EG&E sa odgovarajućom opremom

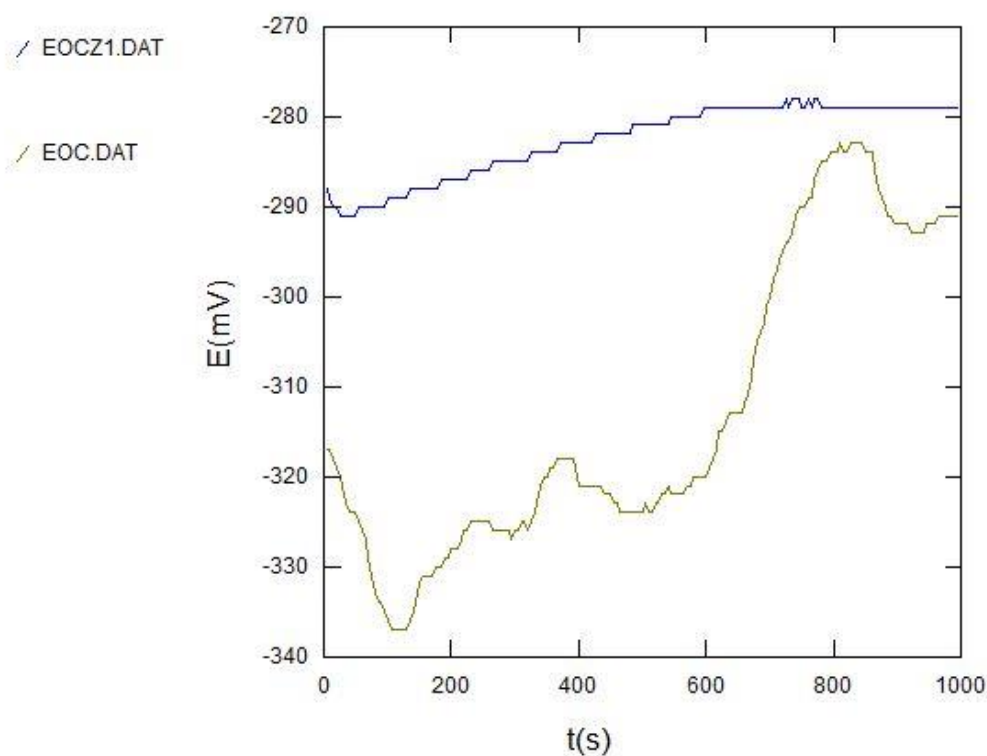
Određivanje korozijskog potencijala

Korozijski potencijal određen je u odnosu na referentnu elektrodu tijekom ispitivanja od 16 minuta pri temperaturi od $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Nakon završetka ispitivanja uzete su konačne vrijednosti korozijskog potencijala za uzorke. Na licu zavora provedena su dva mjerenja, te na uzorku osnovnog materijala također su provedena dva mjerenja. Uzorci su označavani OM1, OM2, Z1, Z2. Rezultati E-t ispitivanja dani su u tablici 20.

Tablica 20. Vrijednosti korozijskog potencijala

	E_{kor} [mV]
OM1	-291
OM2	-295
Z1	-291
Z2	-236

Dobivene negativne vrijednosti korozijskog potencijala (E_{kor}) ukazuju na nestabilnost uzoraka, odnosno u tom slučaju dolazi do otapanja ispitnih uzoraka. Uzorak osnovnog materijala ima negativniji korozijski potencijal od uzorka metala zavora, što znači da se metal zavora sporije otapa od osnovnog materijala u 3,5% otopini NaCl, što se jasnije vidi na slici 50 gdje je grafički prikazano kretanje korozijskog potencijala tokom mjerenja (16 min).



Slika 50. Kretanje korozivnog potencijala tokom ispitivanja za uzorke metala zavara i osnovnog materijala

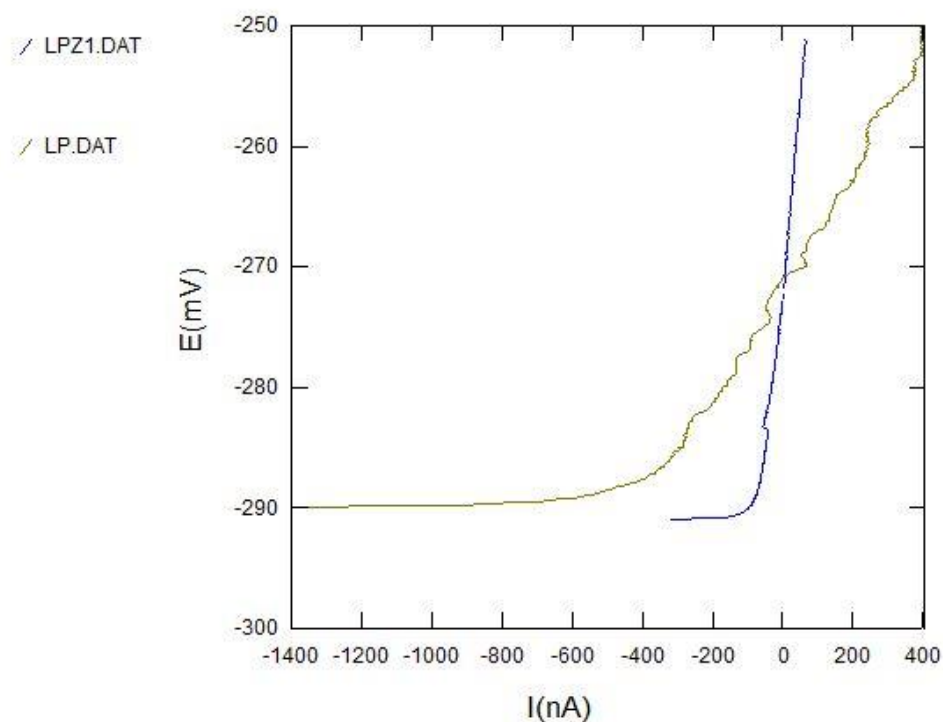
Određivanje polarizacijskog otpora R_p

Nakon ispitivanja korozivnog potencijala osnovnog materijala i materijala zavara u 3,5 % otopini NaCl, provedeno je određivanje polarizacijskog otpora uzoraka pri temperaturi 20 ± 2 °C. Polarizacijski otpor je mjera otpora metala prema koroziji i definira se nagibom krivulje potencijal – struja u neposrednoj blizini korozivnog potencijala. Veća vrijednost polarizacijskog otpora ukazuje na veću otpornost materijala na medij u kojem se nalazi. U tablici 21 prikazani su rezultati polarizacijskog otpora za uzorke.

Tablica 21. Vrijednosti polarizacijskog otpora R_p

	R_p [$k\Omega/cm^2$]
OM1	47,66
OM2	49,35
Z1	316
Z2	316,45

Iz tablice je vidljivo da znatno veći polarizacijski otpor ima metal zavara u odnosu na osnovni materijal. Grafički je to prikazano slikom 51 gdje je nagib krivulje (potencijal - struja) znatno veći za metal zavara (plava linija) u odnosu na nagib krivulje za osnovni materijal (smeđa linija).



Slika 51. Preklap polarizacijskog otpora za metal zavara i osnovni materijal

Analiza rezultata Tafelove metode

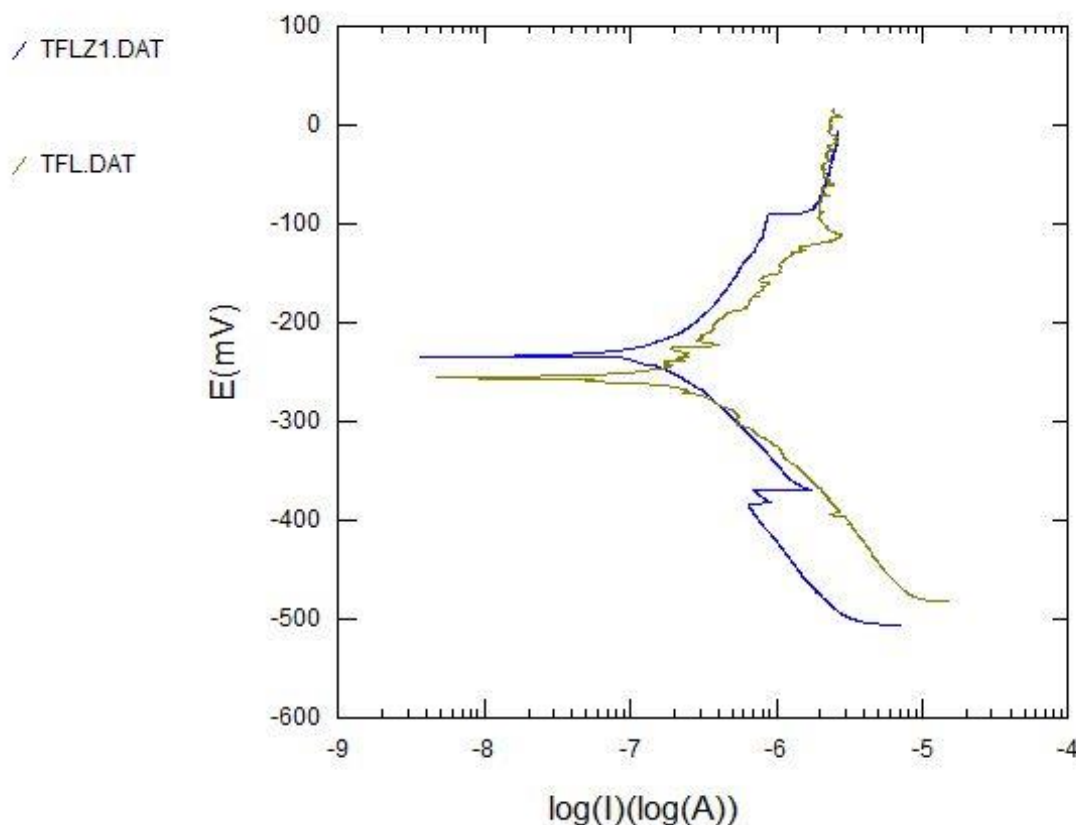
Kod Tafelove metode rezultati dobiveni anodnom i katodnom polarizacijom u širokom području potencijala od korozijskog potencijala ($E = E_{kor} \pm 250$ mV) prikazuju se grafički u polulogaritamskom obliku ($E - \log j$). Ekstrapolacijom anodnih i katodnih Tafelovih pravaca u njihovom sjecištu određuju se vrijednosti gustoće korozijske struje j_{kor} i korozijskog potencijala [31]. Ispitivanje je provedeno pri temperaturi od 20 °C u 3,5 % otopini NaCl.

U tablici 22 prikazani su rezultati dobiveni Tafelovom metodom, korozijska struja (j_{kor}) i brzina korozije (v_{kor}).

Tablica 22. Dobivene vrijednosti Tafelovom metodom tokom ispitivanja

	v_{kor} [mm/god]	J_{kor} [nA]
OM1	$5,7 \times 10^{-3}$	452,5
OM2	$5,6 \times 10^{-3}$	430,8
Z1	$4,99 \times 10^{-3}$	564,8
Z2	$4,99 \times 10^{-3}$	502,4

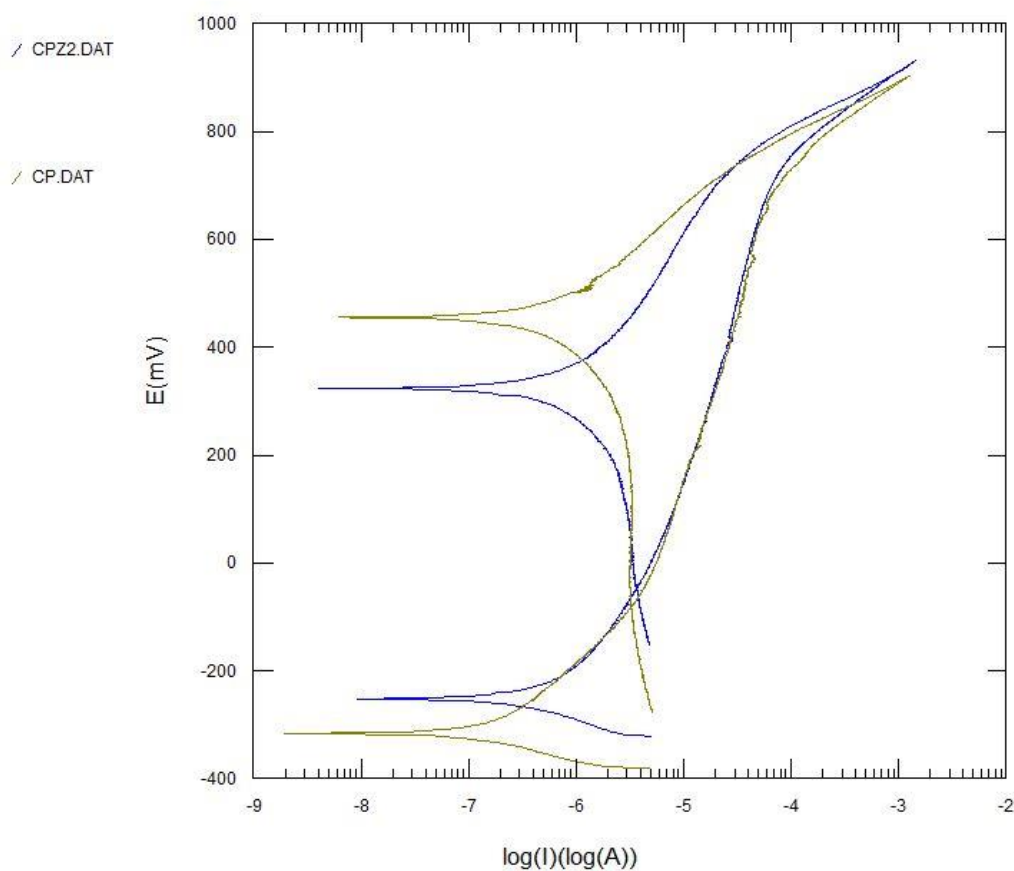
Iz vrijednosti koje su prikazane u tablici vidljivo je da veća korozijska struja znači i manja brzina korozije, što je povoljniji slučaj. Iako se radi o vrlo malim brzinama korozije ispitivanje je pokazalo da manju brzinu korozije ima metal zavora. Na slici 52 prikazan je preklap krivulja osnovnog materijala i metala zavora, vidljivo je da krivulja osnovnog materijala brže raste u logaritamskog mjerilu što znači da osnovni materijal je sklon bržem trošenju uzrokovanom korozijom.



Slika 52. Preklap krivulja osnovnog materijala i metala zavora kod Tafelove metode

Ciklička polarizacija

Metoda cikličke polarizacije se provodi kako bi se odredila tendencija materijala prema nastanku rupičaste korozije (engl. pitting) u primijenjenoj korozivnoj sredini. Ispitivanje je provedeno u 3,5 % otopini NaCl pri temperaturi 20 ± 2 °C. Ispitivanjem sklonosti prema rupičastoj koroziji osnovnog materijala i metala zavora valja uočiti nagli skok vrijednosti struje na anodnom pravcu što je definicija potencijala pitinga (Epit). Ali na grafu taj skok se ne raspoznaje, kao što nije ni uočena histerezna promjena struje u katodnom pravcu, što je prikazano grafički na slici 53. Navedene činjenice ukazuju na zaključak da osnovni materijal i metal zavora pokazuju izvrsnu otpornost prema rupičastoj koroziji, kao što je navedeno u tehničkim karakteristikama materijala.



Slika 53. Preklap krivulja osnovnog materijala i metala zavora kod cikličke polarizacije

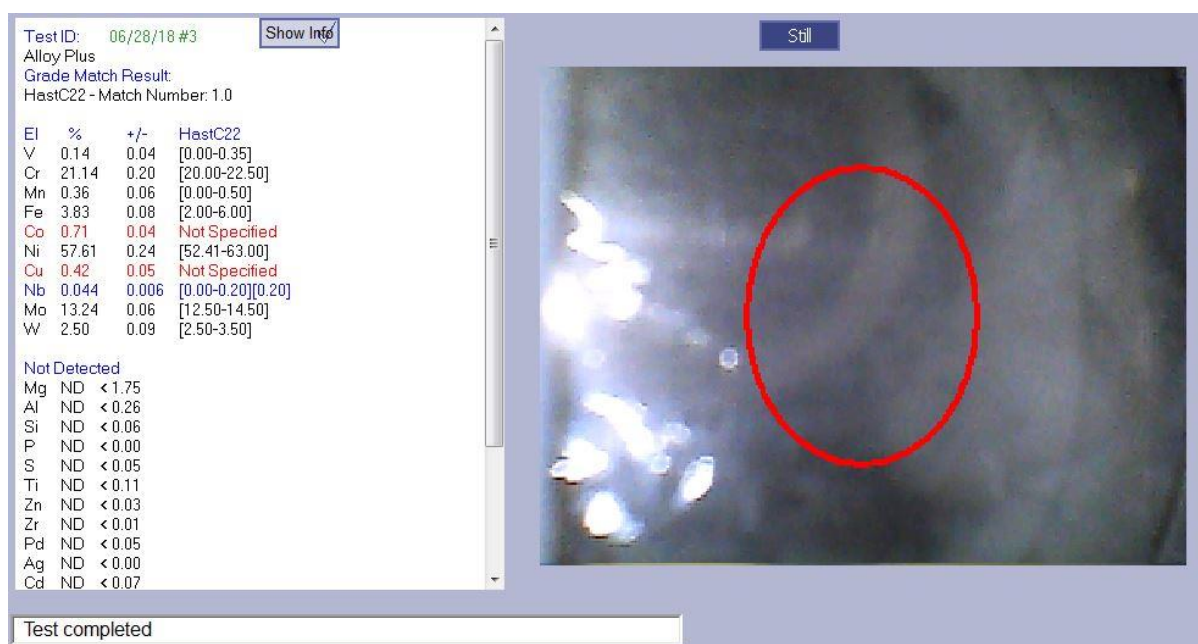
9.8. Određivanje kemijskog sastava

Nakon elektrokemijskih ispitivanja korozijskog djelovanja, provedeno je ispitivanje kemijskog sastava osnovnog materijala i metala zavora. Ispitivanje se provelo, u laboratoriju za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje, na uređaju XRF – analizator, proizvođača Innov-X Systems, uređaj je prikazan na slici 54.



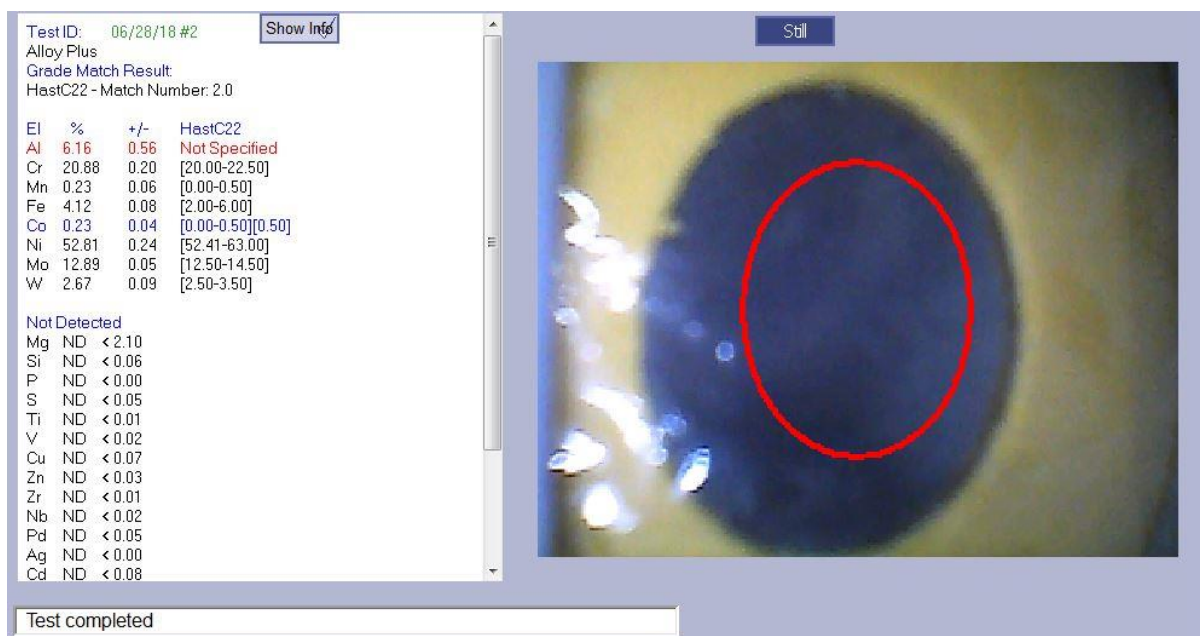
Slika 54. XRF analizator

Dobiveni rezultati za uzorak osnovnog materijala super legure Hastelloy C-22, potvrdili su da se radi o navedenom materijalu. Uz kemijski sastav na slici 55 prikazano je i mjesto mjerenja na osnovnom materijalu.



Slika 55. Kemijski sastav osnovnog materijala

Rezultati mjerenja kemijskog sastava na metalu zavara, dodatnog materijala oznake Ni 6022 pokazali su blaga odstupanja u kemijskom sastavu u odnosu na specificirani sastav što se može pripisati nepreciznosti uređaja. Na slici 56 prikazano je mjesto mjerenja na licu zavara, te dobiveni rezultati kemijskog sastava.



Slika 56. Kemijski sastav dobivenog zavarenog spoja

9.9. Analiza rezultata

Eksperimentom je provedeno sučeljeno zavarivanje ploča super legure Hastelloy C-22, čiji je spoj bio sa V pripremom. Korijenski prolaz napravljen je sa naponom 9,8 V i strujom 85 A što se pokazalo kao mala vrijednost struje jer korijenski zavar nije bio potpun, te se kasnije morao napraviti dodatni korijenski prolaz sa suprotne strane. Parametri ostalih prolaza bili su adekvatno namješteni, električni luk bio je stabilan, zavari su jednoličnog izgleda sa pravilnom raspodjelom taline.

Analizom makroizbrusaka utvrđena je pravilna geometrija zavarenog spoja do korijenskog prolaza gdje je vidljivo znatno proširenje taline, što je posljedica popravka zavarenog spoja. Analizom mikrostrukture zavarenog spoja primjećena je dendritna mikrostruktura, bez većih dislokacija i uključina, koje bi predstavljale nečistoće te time ugrozile čvrstoću zavarenog spoja. Mikroskopskom analizom mikrostrukture osnovnog materijala utvrđena je austenitna mikrostruktura sa grubim zrnima.

Iako se radi o vrlo otpornom osnovnom i dodatnom materijalu prema koroziji, elektrokemijskim ispitivanjem se utvrdila veća postojanost metala zavora prema 3,5 % otopini NaCl u odnosu na osnovni materijal, što je posebno dokazano mjerenjem korozijskog potencijala (E_{kor}) i polarizacijskog otpora R_p .

Tafelovom metodom utvrđeni su vrlo mali iznosi brzine korozije (v_{kor}) i kod osnovnog materijala i metala zavora, ali ipak kod osnovnog materijala je uočena nešto veća brzina korozije.

Cikličkom polarizacijom dokazana je potpuna otpornost osnovnog materijala i metala zavora prema rupičastoj koroziji.

Ispitivanjem kemijskog sastava osnovnog materijala dokazano je da se zaista radi o super leguri nikla Hastelloy C-22, dok su se u kemijskom sastavu metala zavora pokazala blaga odstupanja od specificiranog kemijskog sastava što se može pripisati nepreciznošću mjernog uređaja.

Može se izvesti zaključak da su priprema zavarenog spoja, odabir dodatnog materijala i zaštitnog plina te parametri zavarivanja bili pravilno određeni, te da je postupak zavarivanja pravilno izveden, što je potkrijepljeno rezultatima navedenih ispitivanja. Dokazalo se da metal zavora ima bolja svojstva i višu otpornost prema agresivnom mediju nego osnovni materijal, što je i cilj prilikom propisivanja specifikacije zavarivanja.

10. ZAKLJUČAK

Legure nikla se danas najviše koriste u zahtjevnim postrojenjima kao što su kemijska, farmaceutska i procesna industrija, a važnu ulogu imaju i kod izgradnje elektrana (kotlovi, izmjenjivači topline), te kod izrade dijelova mlaznih motora. Takva postrojenja rade u trajnom pogonu te nema vremena za popravak ili remont, te se postavljaju visoki zahtjevi pri odabiru materijala. Ni legure te zahtjeve najčešće ispunjavaju, jer ih krasi visoka otpornost na oksidaciju, rupičastu koroziju, otpornost na morsku okolinu, postojanost pri visokim temperaturama.

Zavarivački procesi kod kojih se koristi inertni plin, kao što su TIG i MIG, su uobičajeni i primjenjivi kod svih Ni legura. Proces i kod kojih imamo trosku, kao što su REL, EPP i praškom punjena žica su većinom upotrebljivi kod korozijski otpornih materijala i kod onih legura koje ne sadrže reaktivne elemente.

Jedna od dominantnijih Ni legura je svakako Hastelloy C-22. Njezine karakteristike uz dobru otpornost prema svim pojavnim oblicima korozije, su i dobra zavarljivost, te dobra oblikovljivost u industrijske dijelove. Za najvišu kvalitetu zavara kod navedene legure upotrebljava se TIG postupak zavarivanja u zaštitnoj atmosferi 100 % argona, potrebna je zaštita i korijenskog prolaza, također sa 100 % argonom. Dodatni materijal je u obliku žice približno istog sastava kao i osnovni materijal, te mora imati istu ili veću čvrstoću od osnovnog materijala.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je TIG zavarivanje ploča super legure Hastelloy C-22. Zavarivalo se istosmjernom strujom (DC), s elektrodom na - polu. Električni luk je tijekom zavarivanja svih prolaza bio stabilan. Jedina nepravilnost bila je ta što se korijenski zavar napravio sa niskom strujom (85 A), te je potom bio nužan popravak korijenskog prolaza sa suprotne strane zbog nepotpunog provara. Tu nepravilnost u geometriji zavara pokazala je analiza makroizbrusaka, na čijem se uzorku vidi znatno proširenje zavara sa suprotne strane ploča.

Analizom mikrostrukture kod osnovnog materijala utvrđena je grubozrnata austenitna mikrostruktura, dok kod mikrostrukture metala zavara nije uočeno daljnje pogrubljivanje zrna što je dokaz da osnovni materijal ima izvrsnu zavarljivost.

Elektrokemijskim ispitivanjem korozijskog djelovanja istosmjernom strujom (DC) dokazana je visoka otpornost osnovnog materijala i metala zavara na koroziju, uz malu prednost metala zavara u odnosu na osnovni materijal.

Određivanjem kemijskog sastava osnovnog materijala potvrđen je kemijski sastav koji je i naveden u katalogu, dok su se kod kemijskog sastava metala zavara pojavila blaga odstupanja između izmjerenog i specificiranog kemijskog sastava što se može pripisati nepreciznosti mjernog uređaja.

Legure na bazi nikla sa svojim dobrim svojstvima na visokim temperaturama, kao što je otpornost prema puzanju i otpornost na visokotemperaturnu oksidaciju svakako jamče dugotrajnost postrojenja u kojima se koriste. Te izuzetno dobre karakteristike legura opravdane su visokim cijenama, ali da bi se zahtjevi u potpunosti ispunili potrebno je znanje za postavljanje točnih parametara za zavarivanje, za odabir dodatnog materijala te pravilna tehnika rada, kako bi se izbjegle pogreške pri zavarivanju, te neugodne situacije tijekom eksploatacije.

LITERATURA

- [1] Inženjerski priručnik IP4: Proizvodno strojarstvo – Materijali, Školska knjiga; Zagreb; 1998.
- [2] Skupina autora: ASM Handbook; Volume 2; Properties and Selection: Non ferrous Alloys and Special – Purpose Materials
- [3] Pavić J., Duspara M., Horvat M.: Zavarivanje legure Monel 400 TIG postupkom zavarivanja, Slavonski Brod, 2011.
- [4] Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2011.
- [5] https://www.google.hr/search?q=corrosion+nickel&rlz=1C1PRFC_enHR738HR738&source=lnms&tbn=isch&sa=X&ved=0ahUKEwiZtcuK47XdAhVH_qQKHcCiARsQ_AUICigB&biw=1280&bih=694#imgsrc=uBwEQKFzTW5RQM., dostupno 2.9.2018.
- [6] Esih I., Dugi Z.: Tehnologija zaštite od korozije I, Školska knjiga, Zagreb, 1990.
- [7] Skupina autora: ASM Handbook; Volume 9; Metallography and Microstructures
- [8] www.haynesintl.com/docs/c-22-brochure.pdf, dostupno 4.9.2018.
- [9] www.sangeetametal.com, dostupno 4.9.2018.
- [10] Brkić D.: Oštećenja zrakoplovnih konstrukcija uzrokovanih korozijom; Diplomski rad; Sveučilište u Zagrebu; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2008.
- [11] Skupina autora: ASM Handbook; Volume 1 – Properties and selection: Irons, Steels and High Performance Alloys
- [12] <https://www.sfsb.hr/kth/zavar/zavar/nikl.html>, dostupno 7.9.2018.
- [13] Rowe, M.D., Manning, P.E.: Zavarivanje niklenih legura, Haynes International INC, Indiana USA
- [14] Kraut B; Strojarski priručnik; Tehnička knjiga Zagreb, 2009.
- [15] Čolić L.: Robotizirano zavarivanje nehrđajućih čelika A-TIG postupkom; Diplomski rad; Sveučilište u Zagrebu; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015.
- [16] Babić N.: Utjecaj sustava aktivacijskog premaza na svojstva zavara pri robotiziranom A-TIG zavarivanju čelika AISI 304; Sveučilište u Zagrebu; Fakultet strojarstva i brodogradnje; Zagreb, 2015.
- [17] Babić N.: A.TIG zavarivanje duplex čelika; Diplomski rad; Sveučilište u Zagrebu; Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.

- [18] <http://www.everlastgenerators.com/advantages-of-tig-welding-machines.php>, 2011., dostupno 2.11.2018.
- [19] Handbook for GTAW – Gas Tungsten Arc Welding, AWS, 1987.
- [20] Milić, M.: Priručnik za zavarivače, 2. Dopunjeno izdanje; 2008.
- [21] Pikelj T.: Orbitalno TIG zavarivanje, Završni rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [22] Živčić M.: TIG zavarivanje – osnovne karakteristike postupka, Zavarivanje, broj 1, 1985.
- [23] Horvat M., Kondić V., Brezovečki D.: Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja, Technical journal 8, 4 (2014), 2014.
- [24] American Welding Society: Welding Handbook – volume 2; American Welding Society, 1991.
- [25] Lippold, J.C.: Welding Metallurgy and Weldability, Ohio State University
- [26] http://www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/na_dipl4/3_2.pdf, dostupno 9.9.2018.
- [27] Ćorić. D.: Posebni metalni materijali, predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2016/2017.
- [28] http://www.fronius.com/cps/rde/xchg/fronius_international/hs.xsl/79_7406_ENG_HTML.html.WAififl96M8 , dostupno 27.10.2018.
- [29] <http://www.daikowelding.com/wp-content/uploads/2015/03/Daiko-SF-622-1031.pdf>, dostupno 18.10.2018.
- [30] Bard A. J., Faulkner L.R.: Electrochemical Methods – Fundamentals and Applications, John Wiley & Sons, Inc, University of Texas, Austin, 2001.
- [31] Juraga I., Alar V., Stojanović I.: Korozija i zaštita premazima; Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.

PRILOZI

I. CD - R disc